Kenneth W. Ford

101 SORUDA KUANTUM

GÖREMEDİĞİNİZ DÜNYA HAKKINDA
BİLMENİZ GEREKEN HER ŞEY

4. BASKI

ALFA | BİLİM

Kenneth W. Ford

101 SORUDA KUANTUM

GÖREMEDİĞİNİZ DÜNYA HAKKINDA BİLMENİZ GEREKEN HER ŞEY

"Kuantum fiziğindeki 'büyük fikirlerin' kesin bir listesi yok. Ancak kuantum fiziğinin doğa kavrayışımıza kazandırdıklarının özünü yansıtan on iki fikir var. Bunların tümünün ortak noktası fiziksel dünyanın nasıl işlemesi gerektiğine dair gündelik deneyimimize dayanarak kazandığımız beklentilerle, bir diğer deyişle 'sağduyuyla' çelişiyor olmaları..." Konusunda uzman bir fizikçi olan Kenneth W. Ford, dikkatlice seçilmiş 101 sorunun cevabını herkesin anlayabileceği bir şekilde vererek, kuantum kuramının üzerindeki gizemi kaldırmayı amaçlıyor. Son yıllarda çok sık rastladığımız 'yanlış kuantum önyargılarını' bu 101 soru-cevapla çürütüyor. Kuantum fiziğinin en temel özelliklerinin birer özetinin yer aldığı kitap, kuantum konusunda bilmeniz gereken her şeyi özetliyor.

ALFA
www.alfakitap.com /alfakitap /alfakitap /alfakitap

ALFA BİLİM-FİZİK
ISBN: 978-605-106-405-5
9 786051 064055

101 Soruda Kuantum
© 2011, ALFA Basım Yayım Dağıtım San. ve Tic. Ltd. Şti.

101 Quantum Questions
© 2011 by the President and Fellows of Harvard College

Kitabın Türkçe yayın hakları Akcalı Ajans aracılığıyla Alfa Basım Yayım Dağıtım San. ve Tic. Ltd. Şti.'ne aittir. Tamtım amacıyla, kaynak göstermek şartıyla yapılacak kısa alıntılar dışında hiçbir yöntemle çoğaltılamaz.

Yayıncı ve Genel Yayın Yönetmeni M. Faruk Bayrak
Genel Müdür Vedat Bayrak
Yayın Yönetmeni Mustafa Küpüşoğlu
Dizi Editörü Kerem Cankoçak
Kapak Tasarımı Ferah Perker
Grafik Uygulama Mürüvet Durna

ISBN 978-605-106-405-5
1. Basım: Aralık 2011
4. Basım: Aralık 2016

Baskı ve Cilt
Melisa Matbaacılık
Çiftehavuzlar Yolu Acar Sanayi Sitesi No: 8 Bayrampaşa-İstanbul
Tel: 0(212) 674 97 23 Faks: 0(212) 674 97 29
Sertifika no: 12088

Alfa Basım Yayım Dağıtım San. ve Tic. Ltd. Şti.
Alemdar Mahallesi Ticarethane Sokak No: 15 34110 Cağaloğlu-İstanbul
Tel: 0(212) 511 53 03 (pbx) Faks: 0(212) 519 33 00
www.alfakitap.com - info@alfakitap.com
Sertifika no: 10905

Kenneth W. Ford

101 SORUDA KUANTUM

GÖREMEDİĞİNİZ DÜNYA HAKKINDA BİLMENİZ GEREKEN HER ŞEY

Çeviri
Barış Gönülşen

ALFA | BİLİM

Joanne'a

ve

Paul, Sarah, Nina, Caroline, Adam, Jason ve Ian'a

ve

Charlie, Thomas, Nate, Jasper, Colin, Hannah, Masha, Ana, Daniel, Casey, Toby, Isaiah, Naima ve Steven'a;

ve

Ders verme ayrıcalığına sahip olduğum tüm öğrencilere,

Yaşamımın zenginleşmesine yardımcı olan herkese...

İÇİNDEKİLER

Önsöz

Kuantum Fiziğinin Büyük Fikirleri 13

Teşekkürler 15

I. Bölüm

Atom-Altı Dünya 17

1 Kuantum nedir? 17

2 Kuantum fizik yasaları nerede hüküm sürer? 20

3 Uyumluluk ilkesi nedir? 21

4 Bir atom ne kadar büyüktür? 23

5 Atomun içinde ne vardır? 24

6 Katı madde eğer çoğunlukla boş mekânsa neden katıdır? 28

7 Bir elektron ne kadar büyüktür? İçinde bir şey var mıdır? 30

II. Bölüm

Derine İnmek 35

8 Bir çekirdek ne kadar büyüktür? İçinde ne vardır? .. 35

9 Proton ve nötronun büyüklüğü nedir? İçlerinde ne vardır? 39

10 Planck sabiti nedir ve neden önemlidir? 42

11 Foton nedir? 45

12 Fotoelektrik etki nedir? 48

13 Hangi parçacıkların temel olduğu düşünülmektedir? Hangi parçacıklar bileşiktir? 49
14 Standart model nedir? 51

III. Bölüm

Küçük ve Çevik 53
15 Kuantum mesafe ölçekleri nelerdir? 53
16 Bir parçacık başka bir parçacığı etkilemek için ne kadar uzağa "uzanabilir"? 54
17 Parçacıklar hangi hızla hareket eder? 58
18 Kuantum zaman ölçekleri nelerdir? 59
19 $E=mc^2$'nin anlamı nedir? 60
20 Elektrik yükü nedir? 64
21 Spin nedir? 66

IV. Bölüm

Kuantum Öbekler ve Kuantum Sıçramalar 71
22 Neler öbeklidir, neler değildir? 71
23 "Hareket durumu" nedir? 74
24 Uyarılmış hareket durumundaki bir hidrojen atomu farklı durumdaki aynı atom mudur, yoksa başka bir atom mudur? 76
25 Kuantum sayıları nedir? Birleştirilme kuralları nedir? 78
26 Kuantum sıçrama nedir? 84
27 Kuantum fiziğinde olasılığın rolü nedir? 87
28 Kuantum dünyasında hiç belirlilik var mı? 91

V. Bölüm

Atomlar ve Çekirdekler 93
29 Çizgi spektrumu nedir? Bize atomlar hakkında ne öğretmektedir? 93
30 Element tablosu neden periyodiktir? 100

31 Ağır atomlar neden hafif atomlarla neredeyse aynı büyüklüktedir? 102
32 Protonlar ve nötronlar çekirdek içerisinde nasıl hareket ederler? 104
33 Atom numarası ve (bağıl) atom kütlesi nedir? 107

VI. Bölüm

Çekirdeklere Devam 111
34 Periyodik tablo niçin son bulur? 111
35 Radyoaktivite nedir? Biçimleri nelerdir? 114
36 Nötron çekirdek içerisinde kararlıyken, yalnız olduğunda neden kararsızdır? 119
37 Nükleer bölünme (fisyon) nedir? Neden enerji açığa çıkartır? 121
38 Nükleer birleşme (füzyon) nasıl gerçekleşiyor? 126

VII. Bölüm

Parçacıklar 129
39 Lepton nedir? Nitelikleri nelerdir? 129
40 Kaç farklı nötrino var? Nereden biliyoruz? 133
41 Nötrinoların kütlesi var mıdır? Neden "salınırlar"? ... 137
42 Parçacıkların gerçekten sadece üç nesli mi vardır? ... 144
43 Tüm elektronların özdeş olduğunu nereden biliyoruz? 146

VIII. Bölüm

Parçacıklara Devam 149
44 İsimler, isimler, isimler. Tüm bunlar ne anlama geliyor? 149
45 Kuarkların özellikleri nelerdir? Nasıl birleşirler? .. 151
46 Bileşik parçacıklar hangileridir? Sayıları nedir? 155
47 Her parçacığın bir fermiyon ya da bir bozon olması zorunlu mudur? Bu iki sınıfı ayıran nedir? 159
48 Bose-Einstein yoğunlaşması nedir? 163
49 Bozon ve fermiyonlar isimlerini nereden aldılar? .. 166

IX. Bölüm

Etkileşimler 171

50 Feynman diyagramı nedir? 171

51 Feynman diyagramlarının ana özellikleri nelerdir? 176

52 Feynman diyagramlarında yeğin, zayıf ve elektromanyetik etkileşimler nasıl gösterilir? 179

53 Hangi parçacıklar kararlıdır? Hangileri kararsızdır? Bir parçacığın bozunduğunu söylemek ne anlama gelmektedir? 184

54 Saçılım nedir? 186

55 Bir saçılım veya bir bozunumun öncesi ve sonrasında aynı kalan nedir? 187

56 Bir saçılım veya bozunum sırasında ne değişir? 189

X. Bölüm

Değişimdeki Sabitlik 191

57 Mutlak korunum yasalarının "dört büyükleri" kimler? 191

58 Kuantum dünyasında başka hangi mutlak korunum yasaları geçerlidir? 193

59 TCP teoremi nedir? 195

60 Sadece "kısmi" olan korunum yasaları hangileridir? 198

61 Hangi simetri ilkeleri sadece "kısmidir"? 201

62 Yasaklama ve zorunluluk yasaları nedir? 206

63 Simetri, değişmezlik ve korunum kavramları birbirleriyle nasıl ilişkilenmektedir? 209

XI. Bölüm

Dalgalar ve Parçacıklar 213

64 Dalgalar ve parçacıkların ortak noktaları nelerdir? Farkları nelerdir? 213

65 De Broglie denklemi nedir? Neden önemlidir? 215

66 Dalgaların kuantum öbekleriyle bağlantısı nedir? 218

67 Dalgaların atomların boyutlarıyla bağlantısı nedir?....222
68 Kırınım nedir? Girişim nedir? 224
69 Çift yarık deneyi nedir? Neden önemlidir? 226
70 Tünelleme nedir? 229

XII. Bölüm

Dalgalar ve Olasılık 231
71 Dalga fonksiyonu nedir? Schrödinger denklemi nedir? . 231
72 Dalgalar olasılıkları nasıl belirler? 235
73 Dalgalar parçacıkların sabit konuma sahip olmalarını nasıl engeller? 238
74 Belirsizlik ilkesi nedir? 240
75 Belirsizlik ilkesi, maddenin dalga doğası ile nasıl ilişkilenir? 242
76 Üst üste binme nedir? 246
77 Dalgalar gerekli mi? 249

XIII. Bölüm

Kuantum Fiziği ve Teknoloji 251
78 Parçacıklar ışık hızına yakın hızlara nasıl çıkartılıyorlar? 251
79 Yüksek enerjili parçacıkların algılanması nasıl gerçekleşir? 255
80 Lazer nasıl çalışır? 259
81 Bir metalde elektronlar nasıl davranır? 263
82 Yarı iletken nedir? 265
83 Bir p-n yüzey birleşimi nedir? Niçin diyottur? 267
84 Diyotlar nerelerde kullanılır? 269
85 Transistör nedir? 271

XIV. Bölüm

Tüm Ölçeklerde Kuantum Fiziği 275
86 Kara delikler neden buharlaşır? 275

87 Güneş'in merkezinde kuantum fiziği nasıl işler? ... 279
88 Süper iletkenlik nedir? ... 281
89 Süper akışkanlık nedir? ... 289
90 Josephson eklemi nedir? ... 285
91 Kuantum benek nedir? ... 288
92 Kuark-gluon plazması nedir? ... 289
93 Planck uzunluğu nedir? Kuantum köpüğü nedir? ... 291

XV. Bölüm

Sınırlar ve Bulmacalar ... 295
94 Fizikçiler neden 137 sayısını severler? ... 295
95 Dolanıklık nedir? ... 298
96 Bell eşitsizliği nedir? ... 301
97 Kubit nedir? Kuantum hesaplama nedir? ... 305
98 Higgs parçacığı nedir? Neden önemlidir? ... 307
99 Sicim kuramı nedir? ... 309
100 "Ölçüm sorunu" nedir? ... 311
101 Niçin kuantum? ... 316

EK A ... 319
EK B ... 325
Dizin ... 329

ÖNSÖZ

Kuantum Fiziğinin Büyük Fikirleri

Kuantum fiziğindeki "büyük fikirlerin" kesin bir listesi yok. Ancak kuantum fiziğinin doğa kavrayışımıza kazandırdıklarının özünü yansıtan on iki fikir var. Bunların tümünün ortak noktası fiziksel dünyanın nasıl işlemesi gerektiğine dair gündelik deneyimimize dayanarak kazandığımız beklentilerle, bir diğer deyişle "sağduyuyla" çelişiyor olmaları.

Genel algı ile kuantum algı arasındaki bağlantı kopukluğunun basit bir nedeni var. İçinde yaşadığımız dünyada kuantum etkileri (ve görelilik etkileri) duyularımız üzerinde doğrudan bir etkide bulunmuyor. Dünyaya dönük (en azından fiziksel dünyaya dönük) yaklaşımımızı bizler gördüklerimiz, duyduklarımız, tadını aldıklarımız, kokladıklarımız ve dokunduklarımız üzerine inşa ediyoruz. Bu dünya yaklaşımının, çok küçük ve çok hızlı olanların dünyası olan kuantum dünyasında da geçerli olduğu ortaya çıkabilirdi, ancak öyle olmadı. Dolayısıyla bize acayip ve olağanüstü görünen yeni fikirlerle karşı karşıya kaldık. Bu kitap boyunca bunlar anlatılacaktır. O yüzden tetikte olmalısınız.

Günlük yaşamlarını kuantum alanında sürdüren canlıların var olduğunu hayal edin. Onlar için aşağıda sıralanan fikirler

hiç heyecan verici olmaz, tersine apaçık olurdu. Biz dünyalılar için ise akla hayale sığmayan ürkütücü bir nitelik taşıyorlar.

Kuantum öbeklilik: Doğa, hem Dünya'yı oluşturan madde parçalarında hem de gerçekleşen değişimlerde esasen tanecikli veya öbekli bir yapıya sahiptir.

Olasılık: Küçük ölçekli dünyadaki olaylar, bizler olaylar hakkında bilenebilecek her şeyi biliyor olsak dahi, olasılık hükmeder.

Dalga-parçacık ikiliği: Madde hem dalga hem de parçacık özellikleri gösterebilir.

Belirsizlik ilkesi: Doğada, ölçümlerin hangi kesinliğe kadar yapılabileceğini belirleyen temel bir sınırlama bulunmaktadır.

İmha ve yaratım: Tüm etkileşimler parçacıkların yok olma ve var olmasını içerir ve gerektirir.

Spin: Görünür fiziksel uzama sahip olmayan "nokta parçacıklar" bile spin değerine sahiptir; spin (dönme) kuantize bir özelliktir.

Üst üste binme (süperpozisyon): Bir parçacık veya bir parçacık sistemi aynı anda iki veya daha fazla hareket durumunda olabilir.

Antisosyal parçacıklar: *Fermiyon* denen parçacıklar bir dışarlama ilkesine uyarlar. Özdeş iki fermiyon aynı anda aynı hareket durumunda olamazlar. Periyodik tablo dışarlama ilkesi sayesinde var olur.

Sosyal parçacıklar: *Bozon* denen parçacıklar aynı hareket durumunda toplaşabilirler (hatta bundan "hoşlanırlar"), bu *Bose-Einstein yoğunlaşması* adı verilen üst düzey bir "birlikteliği" mümkün kılar.

Korunum: Bazı nicelikler değişimin tüm süreçlerinde sabit kalırlar. Başka bazı nicelikler (kısmi korunumlu nicelikler) değişimin belirli bazı çeşitleri esnasında sabit kalırlar.

Hız sınırı: Işık hızı doğadaki hız sınırıdır. (Görelilik kuramının bu sonucu, en çarpıcı biçimiyle kuantum dünyasında ortaya çıkar.)

$E = mc^2$: Kütle ve enerji tek bir kavramda birleşir; böylelikle kütle enerjiye, enerji kütleye çevrilebilir. (Görelilik kuramının bir diğer sonucu, kendisini en etkileyici biçimde kuantum dünyasında gösterir.)

Teşekkürler

Bu kitabın hayata geçmesinde yardımları için özellikle üç dosta müteşekkirim: Diane Goldstein, soru-yanıt formunu önermesi ve uygulanmasında cesaretlendirdiği için; Jonas Schultz, taslağı dikkatle okuması ve çok sayıda değerli önerisi için Paul Hewitt, pedagojik kavrayışı ve çok sayıda şekli bu kitaptaki fikirleri hayata taşımaya yardım etti. David Mermin'e de şaşılacak ölçüde titiz incelemesi ve benimle paylaştığı kuantum fiziği kavrayışı için borçluyum.

Michael Fisher ve Anne Zarrella'nın dâhil olduğu Harvard University Press'teki ekibi ile çalışmak büyük bir zevkti. Westchester Book Group'taki Barb Goodhouse ve Carrie Nelkin'e çalışmaya yansıttıkları kararlı ancak nazik –ve etkili– emekleri için minnettarım.

Yolumu sonsuz mükâfatlarla döşeyenler karım Joanne, yedi çocuğum, on dört torunum ve sayısız harika öğrencim oldu. Bu kitabı onlara adıyorum.

I. Bölüm

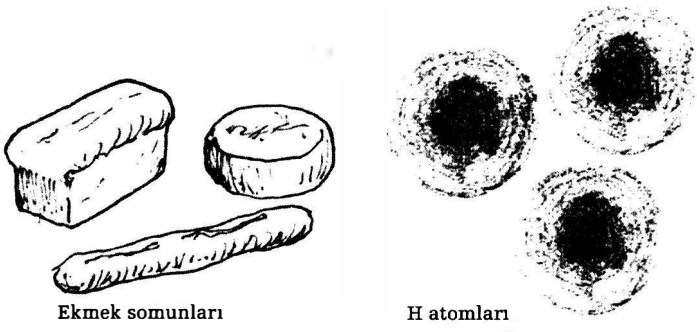
Atom-Altı Dünya

1. Kuantum nedir?

Sözlük anlamıyla kuantum bir öbektir, bir pakettir. Bizi çevreleyen gündelik yaşamda karşımıza belli büyüklükte "öbekler" biçiminde çıkan birçok şey vardır: Ekmek somunları, litrelik sütler, otomobiller gibi. Ancak bir ekmeğin, bir şişe sütün, bir otomobilin ne büyüklükte olacağını söyleyen bir doğa yasası yoktur. Ekmek ustası ekmeğine bir dilim, hatta bir kırıntı düzeyinde ekleme veya çıkartma yapabilir *(Şekil 1)*. Sütçü, sütü yarım litrelik veya bir litrelik şişelerde satıp satmayacağına kendisi karar verir. Araba şirketi, ürününü bir miktar daha büyük veya daha küçük, daha ağır veya daha hafif yapabilir. Kuantum yasalarının hükmettiği küçük ölçekli dünyada ise işler böyle yürümez.[1]

Bir örnek verelim: Bir hidrojen atomu, belli bir çapa sahiptir (*başka* bir kuantum etkisi yüzünden hatlar keskin değildir).

1 *Kuantum* hem sıfat hem de isim olarak kullanılır. Kuantum fizik ve kuantum sıçramalardan bahsettiğimiz gibi, enerji kuantumu veya ışığın kuantumu da deriz. İsmin çoğulu ise *kuanta*'dır.

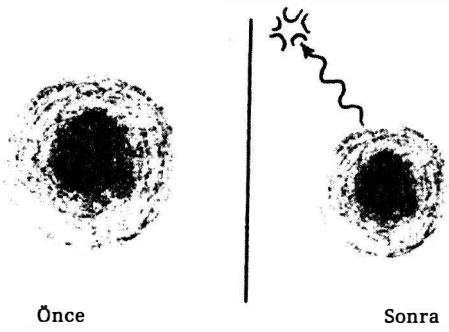


Şekil 1: Ekmek herhangi bir büyüklükte olabilir. Taban durumdaki hidrojen atomlarının tümü aynıdır.

Hidrojen atomunun çapı yaklaşık olarak nanometrenin onda biridir (Bir nanometre - nm, metrenin milyarda biri - 10^{-9} m' dir). Bundan daha küçük hale getirilemez. Bu onun taban durumu dediğimiz büyüklüğüdür. Bu büyüklükle bağlantılı olarak da belli bir enerji, onun taban durumu enerjisidir. Bundan daha az bir enerjiye sahip olması sağlanamaz. Bu, temel hidrojen atomu öbeğidir. Taban durumdaki *her* hidrojen atomu tam olarak aynı boyuta ve aynı enerjiye sahiptir; anlayacağınız bir evrensel hidrojen öbeğiyle karşı karşıya gelmekteyiz. Atom daha büyük ve daha enerjik hale getirilebilir, ancak bu da sadece belli kuantum artışları çerçevesinde mümkündür, herhangi bir seçili artış uygulanamaz. Böylesi daha büyük boyutlara, daha yüksek enerji durumlarına *uyarılmış durumlar* denir *(Şekil 2)*. Uyarılmış bir atom, bir ışık fotonu saldığı ve enerjisini daha yüksek bir değerden daha düşük bir değere düşürdüğü zaman, bir kuantum sıçraması yapıyor demektir.

Ortaya çıkan fotonun kendisi de bir kuantumdur, bir ışık "öbeği"dir. Foton, bir enerji kuantumunu üzerine alır ve bu enerji kuantumunu soğurulduğunda - örneğin retinanız tarafından - yaşamını sona erdirdiği noktada teslim eder.

Fotonun bize gösterdiği gibi, sadece *nesneler* değil, nesnelerin belli *özellikleri* de kuantum öbekleri biçiminde karşımıza çıkar. Örneğin enerji. Bir diğer örnek, elektrik yüküdür. Elektrik yükü, bir proton (veya onun negatif dengi olan bir elektron) ta-



Şekil 2: Uyarılmış durumdaki bir hidrojen atomu, bir foton salar ve taban durumdaki hidrojen atomuna dönüşür.

rafından taşınan miktarın sağlayabileceğinden daha iyi bir yolla ayarlanamaz. Elektrik yükünün 3,7 kuantum birimi gibi bir şey de mümkün değildir. Evrendeki her elektrik yükü, proton veya elektron yükünün tamsayı katıdır. (Bu kuralın bir istisnası vardır. Temel parçacıklar içerisinde kuarklar 1/3 ve 2/3 birim yükler taşırlar, ancak onlar da her zaman öyle bir biçimde birleşirler ki, tüm gözlenen veya ölçümlenmiş yükler proton veya elektron yüklerin tamsayısıdır.)

"Öbekli" özelliğe son bir örnek daha verecek olursak (ileride başka örnekler olacak), her bir parçacığın ve parçacıkların her bir kombinasyonunun spini ya sıfırdır veya en küçük spinin –ki bu elektronun spinidir- tamsayı katıdır. Detaya girmeden söylersek spin, dönme hareketinin etkinlik ölçüsüdür. Teknik olarak, *açısal momentum* dediğimiz niceliğin ölçümüdür. Bir çocuğun topu döner. Atlıkarınca da aynı şekilde döner. Her gün kendi ekseni etrafında bir kez dönen Dünya'mızda da durum aynıdır. Sıfır hariç en küçük spin miktarı elektronun spinidir. Bu en küçük kuantum miktarına proton da sahiptir. Foton, ilginç biçimde, elektron veya protonun iki katı spine sahiptir. Siz veya ben arkamıza dönersek, bunun ne kadar yavaş olduğunun önemi yok, bizim spinimiz astronomik derecede büyük sayıda kuantum birimi eder. Bu öyle büyüktür ki, bir kişinin spininin kuantum doğasını saptama ümidimiz yoktur.

Spin ölçümünde benimsenmiş olan birim, tarihsel nedenlerle fotonunkiyle aynı olmuştur. Buna 1 birim spin denmiştir. Elektronun spini, bu birimle, 1/2'dir. Böylelikle her parçacığın ve dünyadaki tüm varlıkların 0 veya 1/2 veya 1 veya 3/2 veya 2 veya 5/2, vs spini olur, ancak asla bu sayıların arasında bir değer olmaz, spin temel birimin tamsayı katı veya tek tamsayı bölü iki katı dışında bir değer alamaz.

2. Kuantum fizik yasaları nerede hüküm sürer?

"Her yerde" sorumuzun kısa yanıtıdır. Asıl sormak istediğimiz "Kuantum fiziğine nerede dikkat etmeliyiz?" sorusudur. Yanıt şudur: "Çok küçük şeyler dünyasında, yani moleküller dünyası ve onlardan daha küçük olan atomlar dünyasında, onlardan da küçük atomik çekirdekler ve daha da küçük temel parçacıklar dünyasında; atomlar da dâhil olmasına rağmen, genel olarak atom-altı dünya dediğimiz dünyada". İşte öbekliliğin önem kazandığı bu küçük ölçek âleminde dikkat etmeliyiz. Çakıllı bir nehir yatağında, kumlu bir sahilde, yumuşak bir çamur üzerinde yürüdüğünüzü düşünün. Bu yüzeylerin hepsi taneciklidir: çakıl parçaları, kum taneleri, çamur molekülleri... Çakıllı nehir yatağında adımlarınız tedbirli olur. Öbekliliğin bilincindesinizdir çünkü. Kumda granüllülüğün farkındasınızdır, ancak bunu hemen hiç önemsemezsiniz. Çamurda ise moleküler "öbekliliğin" bilincinden çok uzaksınızdır. Mevcut durum fark etme yetinizin çok ötesindedir.

Bir yudum suyu ele alalım. Suyun H_2O moleküllerinden oluştuğunu bilirsiniz, ancak sizin için bu moleküler öbeklilik önem taşımaz; suyun akışkanlığını, basıncını, kıvamlılığını, türbülansını vs ölçen bir fizikçi için de aynı şekildedir. *Klasik fizik* dediğimiz, kuantum öncesi fizik, bardaklar, borular, rezervler dolusu suyla ilgilenmek için tamamıyla uygundur. Tek bir H_2O molekülünü düşündüğümüzde ise işler farklılaşır. Klasik fizik bu meseleyi ele alamaz. Bu bir kuantum varlıktır, anlaşılması ve çalışılması ancak kuantum fiziğinin yardımıyla mümkün olabilir.

Dolayısıyla, sorun ölçek sorunudur. Kuantum fiziği büyük ölçekli dünyamızda da, atom-altı dünyada olduğundan daha az

geçerli değildir. Büyük hacimli maddelerin elektriği ne kadar iyi ilettiği, sıcaklığını 1 derece artırmak için ne kadar ısı gerektiği, renginin ne olduğu gibi birçok özelliği, sadece atomik ve moleküler bileşenlerinin kuantum özelliklerinin bilinmesi yoluyla anlaşılabilir. Yine de böylesi büyük ölçek davranışların kuantum temelleri, bizim doğrudan gözlemimizden uzak durmayı başarırlar. Kuantum fiziği sadece atomik ve atom-altı alanlarda gözümüze görünür.

Bu büyük ölçek / küçük ölçek ikiliğinin kuantum etkilerinin gündelik dünyamızda kendisini doğrudan hissettirdiği az sayıda istisna sözkonusudur. Bunların en dramatik olanlarından birisi de süper iletkenliktir. Çok düşük sıcaklıktaki bazı malzemelerde elektronlar direnç olmaksızın, kelimenin gerçek anlamıyla sürtünmesiz hareket ederler. Bu insan ölçekli dünyamıza dek ulaşan bir kuantum etkisidir. Elektronların sürtünmesiz hareketi, atomların ve moleküllerin çok daha küçük ölçekli dünyasında sıradan bir olaydır. Orada elektronlar sürekli hareket etmektedir. Enerjilerinin minimum bir değerin altına düşmesini engelleyen kuantum yasaları sayesinde yorulmaksızın sonsuza dek hareket edebilirler. Öte yandan bir kablo parçasında elektronlar normalde dirençle karşılaşırlar ve dış bir güçle itilmiyorlarsa akışları durur; tıpkı olağan dünyamızda itilmiyorsa duran diğer her şey gibi. Elektronların itilmeden durmaksızın döndüğü büyük süper iletken bir halka gördüğünüzde, bu kuantum fiziğinin izin verdiği sürtünmesiz hareketin atom-altından makroskobik alana kendisini genişlettiği anlamına gelir. Elektronlar bu büyük halka içerisinde aynen atomun içerisindeki gibi dönmektedirler.

3. Uyumluluk ilkesi nedir?

Kuantum etkileri küçük ölçekli dünyada önemli ve büyük ölçekli dünyada genelde önemsizse, ayrım çizgisi nerededir? Farklı şekilde söylersek, kuantum fiziğiyle klasik fizik arasındaki sınır nerededir? Bu aslında kimi fizikçilerin halen uğraştığı derin bir meseledir. Bazıları, "Evet, kuantum fiziği her yerde geçerlidir ve maddenin tüm hareketlerine hükmeder, ancak büyük sistemler için özel kuantum etkileri (kuantum öbekliliği

gibi) konu dışıdır" demektedir. Diğerleri "Atom-altı dünyada olan bir şeyi ölçtüğümüzde klasik dünyamızdaki büyük aletlerle bu ölçümü yaptığımız için, ölçüm eylemi iki dünyanın ayrılmaz biçimde birbirine bağlanmasına neden olur" tezini ileri sürer. Her iki görüş de klasik fiziğin büyük ölçekli dünyada neredeyse her şeyi başarılı biçimde açıkladığında ve kuantum fiziğin küçük ölçekli dünyada gerekli olduğunda birleşir. Yine her iki görüş de doğaya iki yolla bakmanın bir çelişki oluşturmadığında, kuantum fiziğinin – apaçık görülebilir olsun olmasın- her alanda etkili olduğunda hemfikirdir.

Bu noktada klasik fiziğin ne olduğuna dair birkaç hatırlatmada bulunalım. Esasen on yedinci, on sekizinci ve on dokuzuncu yüzyılda geliştirilen, kuvvet ve hareketin (mekanik); ısı, entropi ve hacimli maddenin (termodinamik); elektrik, manyetizma ve ışığın (elektromanyetizma) fiziğidir. Albert Einstein'ın yirminci yüzyıldaki -özel ve genel- görelilik teorilerine de kuantum dışı oldukları için *klasik* denmektedir. Bunlar, kuantum öbekleri ve kuantum sıçramalarıyla değil, düz değişimle ilgilidirler. Klasik teoriler uygulandıkları alanlarda - bu ister bir buhar makinesini güçlendirme, ister radyo sinyali iletme, isterse de Ay'a bir astronot indirme olsun - şaşırtıcı biçimde başarılıdırlar.

Büyük Danimarkalı fizikçi Niels Bohr, kuantum fiziğinin klasik fizikten tamamen farklı olmasına karşın, onu alaşağı etmediği yönündeki içinden çıkılması imkânsız gibi görünen problemle ilk boğuşanlardan birisi oldu. 1913'te *uyumluluk ilkesini* öne sürdü. Bu ilke, bir kuantum durumu ile sonraki durum arasında artışlar küçüldükçe, klasik fiziğin daha büyük ölçüde kesin hale geldiğini söylüyordu. Bohr'un prensibini ilk olarak uyguladığı hidrojen atomu örneğinde, taban durum ile ilk birkaç uyarılmış durum birbirlerinden dramatik biçimde farklılaşıyorlar ve klasik davranışla bir benzerlik bulunmuyordu; ancak uyarılmış durumun yüzde bir veya iki yüzde birine inersek kuantum ve klasik tanımlar birbirlerine "uyumlu hale gelmeye" başlıyorlardı. Böylelikle elektron için gezegene benzer şekilde bir "yörünge"den söz etmek mümkün hale geliyor ve elektronun 200 durumundan 199 durumuna, 198 duru-

muna, 197 durumuna kuantum sıçramaları, radyasyonun klasik modelde öngörüldüğü gibi soğurulduğu, içe doğru düzgün bir helozonik harekete benzemeye başlıyordu. Gerçekte Bohr uyumluluk ilkesini henüz formüle etmemiş, sadece kullanmıştı. Kuantum ve klasik dünyaların yüksek uyarılmış durumlarda pürüzsüzce birleşmesi gerekliliği düşüncesiyle, taban durumuna dek tüm durumların özellikleri hakkında sonuçlara varabilmesi mümkün olmuştu.

Aslında görelilik için de bir uyumluluk ilkesi vardır. Kütleçekim alanlarının (kara deliğe yakın olanlarla karşılaştırmalı olarak) zayıf olduğu ve hızların (ışığın hızıyla karşılaştırmalı olarak) küçük olduğu yerlerde klasik, görelilik dışı fizik gayet iyi işler. Ancak aynı kuantum fiziği gibi, görelilik zayıf alanlarda ve düşük hızlarda doğru gibi durmamaktadır. Etkileri daha ziyade birçok nedenle göz ardı edilebilir derecede küçüktür.

4. Bir atom ne kadar büyüktür?

Eğer bir protonsanız atom çok büyüktür, sizin yaklaşık yüz binlerce katınız büyüklüğündedir. Öte yandan bir atom, bir insandan çok küçüktür, sizden yaklaşık on milyar kez küçüktür. Anlayacağınız, atomun büyüklüğü görelidir. Bir atom tanesi en iyi optik mikroskopla bile görülemeyecek kadar küçüktür,

Niels Bohr (1885–1962): Fotoğraftaki gençlik döneminde Bohr, çoğu Danimarkalı tarafından bir fizikçi olarak değil, futbolcu kimliğiyle tanınırdı. Yaşı ilerlediği dönemde yazlığının kapısında bir at nalı asılı olmasını bir arkadaşına şöyle açıkladığı rivayet edilir: " Elbette batıl inançlı değilim. At nalının şans getirdiğine inanmıyorum. Ama inanmıyor olsan da işe yaradığını söylediler."*Niels Bohr Archive, Copenhagen; Photo courtesy of AIP Emilio Segre Visual Archives.*

öte yandan fizikçilerin bugün çalıştığı birçok şeyden muazzam derecede büyüktür. Atom-altı dünyanın üst sonuna yakın bir mevkide yer alır. Daha önce belirttiğimiz gibi, bir hidrojen atomunun çapı (taban durumunda), yaklaşık olarak bir nanometrenin onda biri kadardır ve daha ağır atomlar da çok daha büyük değildirler. Yüz bin proton eğer sıra halinde dizilebilselerdi ancak ve sadece bir atomun bir yanından diğer yanına geçebilirlerdi. Yüz bin atomun yan yana sıralanması bile ince bir kâğıt parçasının kalınlığına yetişmez.

5. Atomun içinde ne vardır?

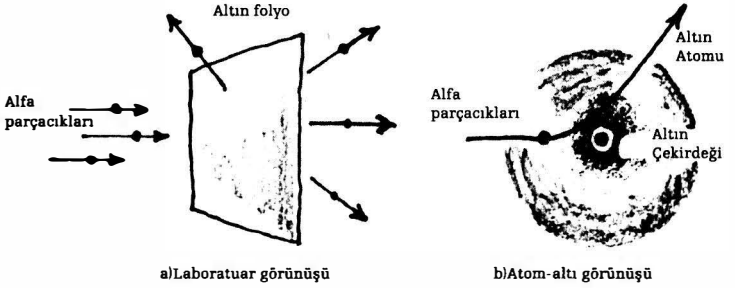
Atomun içinde elektronlar, protonlar, nötronlar ve -nasıl baktığınıza bağlı olarak- bolca boş alan vardır. 20. yüzyıldan önce bazı bilim insanları atomların varlığından şüphe duymaktaydı, ne de olsa var olduklarının kanıtlanması en iyi durumda dahi dolaylı yoldan olmaktaydı. 1905'te Einstein *Brown hareketini* çözümlediğinde atomların varlığı tartışmasız biçimde kabul edildi. Brown hareketi (adını 19. yüzyılda buna ilk dikkat çeken kişi olan İskoçyalı botanikçi Robert Brown'dan almaktadır), bir sıvıda asılı kalan küçük parçacıkların rasgele kesintisiz hareketidir. Brown, hareketi polen taneciklerinde gözlemlemişti ve bunu taneciklerin canlı olmalarına bağlamıştı. Einstein - o zamana dek cansız parçacıklarda görüldüğü bilinen - bu hareketi analiz etti ve (mikroskopla görülebilen) parçacıkların rasgele her taraflarından atom ve moleküllerin çarpmasına tutulduklarını varsayarak durumun tamamıyla anlaşılabileceğini gösterdi. Başka bir deyişle, görünmeyen atom ve moleküller, görülebilen daha büyük parçacıkları iterek ve sallayarak varlıklarını hissettiriyorlardı. Einstein'ın analizi aynı zamanda bireysel atomların boyut ve kütlesini daha tama yakın biçimde tahmin edebilmemizi sağlıyordu.

Yine de bir yarım düzine yıl daha, atomun içi büyük ölçüde gizemli kalmaya devam etti. 1897'de keşfedilen elektronun, atomun içinde bir yer sahibi olduğuna inanmak için geçerli sebepler vardı. Bir atoma göre çok daha küçük olduğu ve çok daha düşük bir hacme sahip olduğu biliniyordu, dolayısıyla mantıksal olarak, atomu oluşturan parçalardan biri olarak

görülebilirdi. Ek olarak bilimciler edinmiş oldukları atomların ışığı soğurması bilgisini, elektronların atomların içinde titreştiğinin kanıtı olarak görüyorlardı. Ayrıca atom toplamda (arada bir yük zerresi kazanıp kaybederek iyona dönüşmesi durumlarını hariç tutarsak) elektriksel açıdan yüksüz olduğu ve elektron da negatif yüklü olduğu için, atomun içinde bir miktar pozitif yük de olmak zorundaydı: elektronların negatif yükünü dengelemeye yetecek miktarda bir pozitif yük. Bu pozitif yükün doğasının ne olabileceği veya atomun içinde nasıl bir dağılım gösterebileceği o dönemde bilinmiyordu. (Bilinmiyordu ancak tahmin edilmiyor değildi. Fizikçiler öngörülü modelleri severler; kimi fizikçiler 20. yüzyılın bu ilk yıllarında "atomun karpuz modeli"ni benimsemişlerdi. Bu modelde pozitif yük atomun tüm içyapısına bir karpuz gibi yayılarak küresel bir doku oluşturmuştur ve elektronlar karpuzdaki çekirdekler gibi içe gömülü biçimde yerleşmiştir.)

Bu duruma açıklık, o dönemde İngiltere'deki Manchester Üniversitesinde çalışan, arada bir keyfi yerindeyse yüksek sesle bir ilahi patlatan, iri yapılı, kaba saba bir Yeni Zelandalı olan Ernest Rutherford'un laboratuarından geldi. Rutherford ve asistanları, radyoaktif bir kaynaktan çıkan alfa parçacıklarını ince altın bir folyoya doğru püskürterek parçacıkların folyodan geçerken ne yönde ve nasıl sapabileceklerini tespit etmeye çalıştılar. Rutherford, alfa parçacıklarının 2 birimlik

Ernest Rutherford (1871–1937). R.G. Matthews tarafından 1907'de yapılan bu portrede Rutherford, kendisine 1908 Nobel Kimya Ödülü'nü kazandıran radyoaktivite üzerine çalışmasını gerçekleştirdiği Kanada'daki McGill Üniversitesindeki laboratuarında görülüyor. Bugün Rutherford'un resmi, doğum yeri olan Yeni Zelanda'nın 100 dolarında basılıdır.



Şekil 3: Alfa parçacıklarının altın folyoya gönderildiği Rutherford deneyi

pozitif bir yüke sahip olan Helyum iyonları olduğunu biliyordu. Ne kadar küçük oldukları hakkında ise hiçbir fikri yoktu, ancak bu hesaplamaları için bir fark oluşturmuyordu. Tahminine göre (ki yanlış çıkmadı), pozitif yükler her bir altın atomu içerisinde düzgün olarak yayılmışlarsa, alfa parçacıkları çeşitli küçük sapmalarla folyonun öbür tarafında belireceklerdi. Şaşkınlık içerisinde, alfa parçacıklarının az sayıdaki belli bir miktarının küçük değişikliklere uğradığını, bazılarının ise çarparak tekrar kaynağa doğru geri döndüklerini gözlemledi. Sonrasında Rutherford bu anı şöyle anlatır: "Bu hayatımda karşılaştığım en olağanüstü olaydı diyebilirim. 15 inç'lik havan topu ince bir kâğıt parçasına doğru ateşlendikten sonra, neredeyse top mermisinin çarpıp dönerek sizi vurması kadar olağanüstüydü."

Rutherford'un ne olduğunu anlaması uzun sürmedi (Şekil 3). Atomun pozitif yükünün küçük bir alanda - bir çekirdekte - atomun merkezinde olması gerektiğini fark etti. Atoma giriş yapan ve bu çekirdeğe yaklaşan bir alfa parçacığı çok büyük bir itici güçle karşılaşıyor ve geri yollanıyordu.[2] Rutherford giren parçacıkların ne kadarının hangi yöne gideceğini matematiksel olarak analiz ederek ilerledi. Deneysel sonuçlar hesap-

2 Aslında büyük bir çekim gücü de hemen hemen aynı etkide bulunurdu, ancak Rutherford çok küçük ve hafif olan elektronların alfa parçacıklarının büyük yön sapmalarının sorumlusu olamayacağını düşündü, dolayısıyla çekirdek pozitif yüklü olmalıydı.

lamalarla tam olarak uyuşmaktaydı. Bu merkezi çekirdeğin ne büyüklükte olduğunu tam olarak ifade edemese de, çekirdeğin atomun toplam büyüklüğünden en az binlerce kez daha küçük olması gerektiğini tespit edebiliyordu. Çekirdeğin gerçek boyutunu tam olarak ortaya çıkarmak için daha enerjik parçacıklarla ek deneyler yapmak gerekiyordu.

Ne olduğunu gözünüzde canlandırabilmek için, elinizi büyük bir kâse pudingin içerisine daldırdığınızı düşünün. El hareketinin yönü ufak tefek değişikliklere uğrasa da, eliniz dibe doğru inmeye devam eder. Şimdi pudingin bir çeşit kurgu-bilimsel kompresöre koyulduğunu ve böylelikle son derece küçük, son derece yoğun ve her birinin elinizden daha kütlesel kriptonit külçelerine dönüştürüldüğünü varsayın. Elinizi bu külçelerin içerisinde yer aldığı bütünün içerisine daldırdığınızda, hiçbirine çarpmadan da ilerleyebilirsiniz, ama bir tanesiyle karşılaşırsanız, ah, yandınız! Elinizi geri teptirebilecek büyüklükte bir kuvveti hissedersiniz.

Boş mekâna gelirsek: Atomun iç kısmına bakmanın aslında iki yolu vardır. Birinci yol, küçücük elektronların boş bir mekânda hızla döndüğünü gözünüzde canlandırmaktır. Güneş'in yörüngesindeki gezegen ve astroidler gibi. Güneş sisteminin çoğunlukla boş mekân olduğunu söylemek kesinlikle doğru olur, çünkü Güneş, tüm gezegenler, uydular ve astroidlerin toplam hacmi, hesaplanarak Plüton'un dışında ve ötesindeki hacimle karşılaştırıldığında, çok daha düşük bir miktara tekabül eder. Ancak elektronlar gezegen değildir. Onlar atomun içerisinde olasılık dalgaları biçiminde dağılım gösterirler. Kuantum fiziğinin temel karakteristiklerinden biri daha sonra açacağımız, dalga/parçacık ikiliğidir. Dalga/parçacık ikiliğine göre bir elektron, uzayın belirli bir noktasında - belli bir olasılıkla - bir parçacık olarak saptanabilir; ancak başka bir şeyi, diyelim ki pozisyonu yerine enerjisini ölçerseniz, elektron atomun içerisinde yayınım yapan bir dalga gibi davranır.

Burada sizlere sunduğumuz fikirler - dalga, parçacık, olasılık - kuantum fiziğinin temel ve asli özellikleridir ve elinizdeki kitap boyunca konu edileceklerdir.

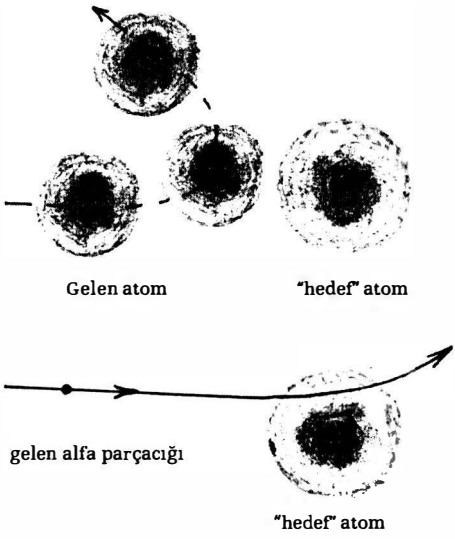
6. Katı madde eğer çoğunlukla boş mekânsa neden katıdır?

Dönen bir uçak pervanesini düşünün. Elektronik flaşla baktığınızda pervanenin diskin küçük bir parçasını işgal ettiğini görürsünüz. Bir poz alırsanız bu kez de tüm diski tamamıyla işgal ediyor görünür. I. Dünya Savaşı'nda savaş pilotları makineli tüfek kurşunlarını dönen pervanelerin arasından sorunsuzca ateşleyebiliyorlardı. Ama kurşun yerine pervane bölümünden bir beyzbol topu fırlatıyor olsalardı, top ya parçalara ayrılacak ya da çarpıp geri dönecekti. Atomlardaki elektronlar da aynıdır. Hızlı bir alfa parçacığı, elektron bulutunun içinden hiçbir engelle karşılaşmamışçasına rahatlıkla geçer. Bir büyük ve yavaş atomsa yaklaştığı atoma çarparak, katı bir küreyle karşı karşıyaymışçasına geri püskürtülür.

Dirseğinizi masaya yasladığınızda sizin atomlarınızla masanın atomları karşı karşıya gelir. Her bir atomun içindeki hızla dönen elektronlar (veya elektron bulutları) diğer atomun içe girmesini engeller. Birbirlerine katı toplar gibi davranırlar. Aslında atomun tam manasıyla bir dış yüzeyi ya da kenarı olmadığı için, fizikçiler atomların birbirlerine "dokunduklarında" ne olduğundan değil, birbirlerine uyguladıkları kuvvetler üzerine konuşmayı tercih ederler. Aralarındaki uzaklık küçükse atomlar birbirini çeker, ancak daha da yakın hale geldikleri belli bir noktada birbirlerini itmeye başlarlar ve çok yakınlaştıklarında da iki atomun birbirine karışmasını engelleyecek şekilde itici güç olağanüstü büyür.

Kuantum dünyasında sıkça görüldüğü üzere, ne sonuç alacağınız hangi deneyi yaptığınıza, neyi ölçtüğünüze bağlıdır. Varsayımsal olarak eğer bir atomu diğerine doğru yuvarlarsanız, sonuç diğer atomun görünüşe göre belli büyüklükte bir katı top olduğunu açığa çıkartacak şekilde, yollanan atomun sekip dönerek uzaklaşmasıdır. (Şekil 4)

Yaşanan, bir bowling topunu başka bir bowling topuna doğru yuvarladığınızda olanlara benzer. Maddenin katı olduğuna hükmedersiniz ve dirseğinizin masanın içine neden girip içe doğru batmadığını anlarsınız. Ama atoma bir "kurşun" (bir alfa parçacığı veya elektron cinsinden) göndermiş olsaydınız



Şekil 4: Bir atom başka bir atoma katı bir top gibi davranır. Yüksek hızlı bir alfa parçacığına atom boş gibi görünür.

yüksek enerjili parçacık büyük olasılıkla doğrudan atomun içinden geçecekti. O zaman da maddenin çoklukla boş mekân olduğuna hükmedecektiniz.

Şimdi kuantum fiziğinin temel bir sorusuna sıçramama izin veriniz: Atomdaki elektron, parçacık mıdır yoksa dalga mıdır? Sıklıkla karşılaşılan yanıt her ikisi de olduğudur. Kendisini belli bir bölge boyunca uzanan bir olasılık dalgası içerisinde yaymış bir parçacıktır. Kendisini sınırları belli olmayan amorf bir bulut veya parçacık olarak gösterebilir, bu ona nerden baktığınıza bağlıdır. Ben elektronun gerçekte bir parçacık *olduğunu* söylemeyi tercih ediyorum, çünkü bir noktada yaratılabilir, yok edilebilir veya ölçülebilir; ancak atom içerisinde hareket durumunda bulunması veya bir yerden başka bir yere dek yayınım yapmasından görüldüğü üzere, bir dalga olarak *davranabilir*.

Bu dalga/parçacık ikiliğinin görselleştirilmesi zordur, belki de imkânsızdır. Sağduyuyla, gündelik deneyimimize dayanarak ulaştığımız şeylerin olma biçimlerine dair beklentimizle çelişmektedir. Sağduyu bize bir şey, kuantum fiziği ise başka bir şey söyleyebilir. Bu rahatsızlık verici belki; ama şaşırtıcı

olmamalıdır, çünkü sağduyumuz klasik dünyadaki deneyimimize dayanmaktadır. Kuantum dünyası hakkındaki bilgilerimizi doğrudan duyularımız yoluyla değil, bir dizi ölçüm aleti aracılığıyla dolaylı olarak ediniriz. Kuantum dünyasının belki de sağduyuyla tutarlı olduğu açığa çıkabilirdi, ama öyle olmadığı görüldü. Bu gerçeğe alışmak zorundayız. Sarsıcı ve rahatsız edici olduğu doğru; ama aynı zamanda heyecan verici bir durum bu.

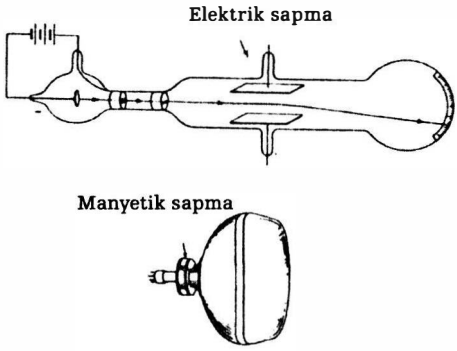
7. Bir elektron ne kadar büyüktür? İçinde bir şey var mıdır?

Elektron, keşfedilen bu ilk temel parçacık, ilk kez 1897'de Cambridge Üniversitesi'nde J.J. Thomson'ın laboratuarında *katot ışını tüpü* denen bir şey içerisinde görüldü.[3] Thomson da, dönemindeki diğer fizikçiler gibi şunu biliyordu: Her biri bir uçta olmak üzere biri pozitif diğeri negatif yüklü iki metal plaka içeren ve içindeki hava büyük oranda alınmış bir cam tüpte, bir çeşit "ışın" negatif plakadan pozitife doğru akmaktaydı. Negatif plaka *katot* (pozitif plaka da *anot*) olarak adlandırıldığı için bu bilinmeyen ışınlara *katot ışınları* denirdi. Thomson, bu ışınların doğasını keşfetmeye koyuldu. Farklı basınçlarda çeşitli gazlar içeren değişik tipte tüpler geliştirdi (bunlardan biri Şekil 5'te gösterilmektedir) ve ışınları manyetik ve elektrik alanlarla saptırdı.[4]

---

3 Babası elektronu keşfettiğinde henüz beş yaşında bir çocuk olan J.J.'in oğlu George, 30 yıl sonra elektronun dalga özelliklerine sahip olduğunu gösteren bilim insanlarından biri oldu. J.J. ve George çalışmaları için Nobel ödülüne layık görüldüler.

4 Katot ışını tüplerini bugün de Thomson'ın kullandığı biçimde kullanıyoruz. Katot ışını tüpleri, düz ekranların çıkmasıyla azalsa da, televizyonlarda ve bilgisayarlarda halen yaygın biçimde kullanılır. Bir elektrik alan yoluyla elektronlara hız kazandırılır ve sonrasında elektronlar manyetik alan aracılığıyla ekranın seçili noktalarına saptırılır. Yapım prensipleri Thomson'ın Şekil 5'te gösterilen aletinin özelliklerini aynen taşıyan modern osiloskoplarda elektrik alanlar elektronların hem hızlandırılması hem de saptırılması için kullanılmaktadır.



Şekil 5: J.J. Thomson tarafından kullanılan bir katot ışını tüpü (üstte) ve günümüzde tüplü televizyonlarda kullanılan modern bir katot ışını tüpü.

Thomson bu özenli çalışmasından bir dizi sonuç çıkardı. Işınlar gerçekte negatif yüklü parçacıklardı. Hafif gazların içerisinden rahatlıkla geçtiklerine göre boyutları çok küçük olmalıydı. Manyetik ve elektrik alanlar yoluyla ölçülebilir biçimde saptırılabildikleri için kütle bölü elektrik yükü (m/e) oranı küçük olmalıydı. *Küçük*ten kastı, hidrojen iyonunun (bugün bildiğimiz gibi bu bir protondur) kütle bölü elektrik yükü oranına göre küçüktü: kabaca bin kat daha küçük olarak hesaplıyordu.

Bu son bulguyla ilgili Thomson şu ifadeyi kaleme aldı: "(m/e)'nin küçüklüğü, m'nin küçüklüğü ya da e'nin büyüklüğünden veya bu ikisinin bir bileşkesinden olabilir." Yine bugün bildiğimiz üzere, bu m'nin küçüklüğündendir. Gerçekte elektron yükünün büyüklüğü e, protonunkiyle tam olarak aynıdır; öte yandan elektronun kütlesi protonunkinden yaklaşık olarak iki bin kez daha küçüktür.

Thomson, atomun büyüklüğünü bilmiyordu. Ama atomun büyüklüğü ne olursa olsun, elektronun ondan çok daha küçük olduğu sonucuna ulaştı. Bugün elektronun olabilecek en küçük büyüklükte olduğunu biliyoruz. Büyüklüğü yok diyoruz. Alt bileşenleri olmadığı da kesin. Elektron, *kompozit*in zıddı anlamında (örneğin proton kompozittir) bizim *temel* dediğimiz bir parçacıktır. Bir parçacığın nasıl olup da kütlesi olmasına karşın büyüklüğü olmadığını, elektrik yükü olmasına karşın

büyüklüğü olmadığını, spini olmasına karşın büyüklüğü olmadığını sorabilirsiniz. Büyüklüğü olmadan nasıl *var olabilir*? Tek yanıt, kuantum fiziğinin var olan bir nesnenin çeşitli fiziksel özelliklerle donatılmış olmasına matematiksel açıdan izin vermesidir. Kuantum elektrodinamiği (KED)[5] adı verilen elektron ve protonlarla ilgili oldukça başarılı teoriye göre, bir elektron bir protonla karşılaştığında, bunu uzay ve zamanda bir nokta üzerinde gerçekleştirmektedir. Aslında böylesi bir karşılaşmada elektron ya ortaya çıkar ya da yok olur, ama bu her zaman belli bir nokta üzerinde olur.

Her şeye karşın kuantum fiziğinin elektronun büyüklüğü hakkında söyleyecek daha pek çok sözü vardır. Bir elektron, sürekli biçimde açığa çıkıp hızla yok oldukları için *sanal parçacık* dediğimiz çok kısa bir süre için ortaya çıkıp kaybolan parçacıklarla, kendisine eşlik eden refakatçileriyle birlikte hareket eder. Durmaksızın değişen eşlikçilerdir bunlar, bir kralla birlikte çıktığı bir hayat yürüyüşüne benzer, kimileri çevresine yeni katılırken, kimilerinin yolları ayrılır; yanındakilerin toplam sayısı sürekli değişir. Kralın yalnız yürümesine asla izin verilmiyorsa, onun "büyüklüğü" fiziksel büyüklüğünden daha büyük olur. Atomun içerisindeki elektron, daha önce değindiğimiz gibi, tüm atoma yayılan bir olasılık dalgası tarafından yönetilir. Bu elektronun, atomun içerisindeki hareketinin belirli bir durumunda yayılarak büyük bir hacme kavuşmasına benzetilebilir.

Buna rağmen elektron en temel seviyede boyutsuz bir nokta olarak görülür. Bu vargı, fizikteki tüm diğer vargılar gibi, geçici bir kesinlik taşır. Net olarak söyleyebileceğimiz, deneye dayanarak şudur: Elektron bir büyüklüğe sahipse, bu büyüklük en iyi halde protondan binlerce kere küçük, atomdansa yüz milyonlarca kez küçüktür. Bugünün teorisi bunu başarılı bir

5 Richard Feynman *QED: The Strange Theory of Light and Matter* (Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1986) adlı okunması büyük keyif veren bir eser kaleme almıştır. Peter Parnell'in bu büyük fizikçiyle ilgili oyununun adı da *QED*'dir. (Los Angeles ve NewYork'ta Alan Alda, Feynman rolünde dikkat çekici bir performans sergilemiştir.)

sonuç olarak değerlendiriyor. Bu konuda pusuda bekleyen ve sahneye çıkmaya büyük oranda hazır olan başka bir teori ise kuantum fiziği ile kütleçekimi birlikte ele alan *sicim teorisi*dir (*bkz.* 99. soru). Sicim teorisine göre, elektronlar ve tüm diğer temel parçacıklar noktasal varlıklar değil, titreşen sicim zerreleridir. Bu sicimlerin büyüklüğü hayal edilemeyecek ölçüde küçüktür. Bir tek protonun büyüklüğüne ulaşmaları için bin milyon kere milyar tanesinin birleşmesi yetmez.

Tüm bu tartışmada "dostumuz elektron"un pratik değerini teslim etmeyi unutmamız ise kabul edilemez. İster Güneş yüzeyinde isterse bir floresan lambasında olsun, ışığın yayınımını sağlayan elektronların hareketidir. Gözünüzün retinasındaki moleküllerin içinde, ışığı emerek görmenizi sağlayan elektronlardır. Yüksek gerilim hatlarında, makinelerde, jeneratörlerde, bilgisayarlarda, ev aletlerinde, sanayi çağının esas işini yüklenen elektronlardır. Ve en sonu, yaşayan her hücrenin içinde yaşama enerji sağlayan yine elektronların değiş tokuşudur.

II. Bölüm

Derine İnmek

8. Bir çekirdek ne kadar büyüktür? İçinde ne vardır?

İkinci soru ile başlayalım. Çekirdeğin içinde protonlar ve nötronlar vardır. Proton pozitif elektrik yükü taşır; nötronun ise elektrik yükü yoktur, nötrdür (adı da buradan gelir). Elektriksel açıdan çok farklı olmalarına karşın bu parçacıklar karşılaştırılabilir kütle ve boyutlara sahiptirler. Protonun kütlesi elektronunkinin yaklaşık 1836 katıdır; nötron da elektrona göre 1839 kat daha kütleseldir. Her ikisi de 10^{-15} m'den biraz daha büyüktürler; bir atomdan yüz bin kez daha küçük, ancak günümüzde parçacık fiziği deneylerinde incelenebilen en küçük uzunluklardan birkaç bin kat da büyüktürler. Böylesine "büyük" olmalarının sebebi temel parçacıklardan olmamaları, birer bileşik (kompozit) olmalarıdır. Üç kuark (onlar *temel*dir) ve birkaç da gluon, her bir proton ve nötronun içinde fırıl fırıl dönmektedir. Ancak bu bahiste şimdilik kuark ve gluonları

Enrico Fermi (1901–1954) burada eşi Laura ve çocukları Giulio ve Nella ile birlikte, muhtemelen 1938 Aralık'ında ABD'ye ayak bastıkları sırada görüntülenmiş. Fizikçiler Fermi'nin İsveç'ten (Nobel Ödülü'nü aldıktan sonra) memleketi İtalya'ya dönerken kaybolduğunu ve kaza eseri Amerika'ya gittiğini söylemekten hoşlanırlar. Laura Fermi, daha sonra *Atoms in the Family* adlı harika kitabını kaleme alacaktır.

göz ardı edebiliriz. Çekirdekler hakkındaki bilgilerimizi ancak onların –*nükleonlar* dediğimiz– proton ve nötron bileşenlerine bakarak çoğaltabiliriz.

Proton esas itibariyle Rutherford'un her atomun merkezinde bir çekirdeğin bulunduğunu gösteren 1911 yılındaki çalışması ile "keşfedilmiştir". Böylelikle en basit atomun, hidrojenin çekirdeğine *proton* denmeye başlandı. İzleyen yirmi yıl boyunca fizikçiler genellikle çekirdeklerin proton ve elektronlardan oluştuğunu varsaydılar: protonlar gereken kütleyi veriyorlar ve elektronlar da protonların elektrik yükünü dengeliyorlardı. Bu modelin yarattığı çok sayıda sıkıntı sözkonusuydu, bunlardan birisi de elektronları protonlara bu derece sıkı biçimde

bağlayabilecek, bilinen bir kuvvetin var olmayışıydı. Ayrıca dalga doğası yüzünden elektronun böylesi küçük bir alana hapsedilmeye karşı büyük bir kuvvetle direnmesi beklenirdi.[6]

1932 yılında Cambridge, İngiltere'de James Chadwick'in nötronu bulmasıyla bu zorluklar bir kılıç darbesiyle ortadan kalkar. Birdenbire her şey aydınlanmıştır: Çekirdekler, protonlar ve nötronlardan oluşmaktadır. Yine de her şey tam anlamıyla açık değildir. Çözülmeyi bekleyen bir bilmece kalmıştır: Çekirdekte hiç elektron yoksa beta bozunumu sürecinde elektronlar nasıl çekirdeklerden dışarıya atılmaktadır? Bunu açıklamak iki yıl sonra Roma'daki Enrico Fermi'ye düşer. Fermi, elektronların çekirdekten çıkarıldıkları anda meydana geldikleri bir kuram önerir. Bu çığır açan kuram, parçacıklar hakkında o güne dek öğrendiklerimizi yeni bir düzleme taşımaktadır. *Bütün* parçacıkların *bütün* etkileşimleri parçacıkların yaratım ve yıkımını, doğum ve ölümünü gerektirmektedir. Sabit ve istikrarlı görünen dünyamız, atom-altı dünyada gerçekleşen neredeyse sonsuz sayıdaki felaketli olayın üzerinde yükselmektedir.

Nötronun keşfedilmesi, elektronları çekirdekten sürmüş olmanın rahatlığıyla fizikçilerin derin bir nefes almalarını sağladı sağlamasına; ancak şimdi karşılarında yeni bir soru vardı. Çekirdekteki nükleonlar tuz kristalindeki sodyum ve klor iyonları gibi sabit konumda mıydılar; bir su damlasındaki H_2O molekülleri gibi kendi aralarında itişip kakışıyorlar mıydı; yoksa havadaki oksijen ve azot (nitrojen) molekülleri gibi serbestçe uçuşmakta mıydılar? 1930'larda Niels Bohr tarafından savunulan sıvı damlacığı modeli, o dönemde çekirdeklerin özellikleri hakkında bilinenleri açıklamak için en uygun model konumundaydı. Bohr ve Princeton'dan genç çalışma arkadaşı John Wheeler, 1939'da keşfedilen nükleer bölünme (*fisyon*) olgusunun açıklamasında sıvı damlacığı modelini çarpıcı bir başarıyla kullandılar. Bir on yıl kadar sonra çekirdeklerin davranışına dair ulaşılan yeni bilgiler, nükleonların çekirdek içinde tıpkı gaz molekülleri gibi serbest hareket edebiliyor olduk-

6 Soru 65'teki tartışma bunun doğruluğunu açıklamamıza yardımcı olacaktır.

larının ipuçlarını vermeye başladı. Bundan sonra öne geçen ve halen de bizlere çekirdeklerin yapısının gayet başarılı bir tasvirini sunan model, birleşik model veya kolektif model dediğimiz, çekirdeklerin aynı zamanda hem sıvı hem gaz özellikleri gösterdikleri model oldu. Kuantum fiziğinin tuhaflıklarından biri de, proton ve nötronların bir sıvıdaki su molekülleri gibi yakın biçimde bir arada durmalarına karşın, hafif gazlardaki moleküller gibi birbirleri içinden geçerek birbirleri arasında koşuşturmakta serbest olmalarıdır. Bunu çok kalabalık bir kokteyl partisinde içki masasının başından bir arkadaşla konuşmaya hayret verici bir hızla geçiş yapan misafirlerin durumuna benzetmemiz mümkün.

Şimdi çekirdeğin büyüklüğü ile ilgili soruya geçebiliriz. Bir çekirdeğin hacmi basit bir şekilde içindeki nükleonların

Fotoğraf, Robert Hofstadter'in (1915–1990) Kasım 1961'de Nobel ödülüne layık görüldüğünün açıklanmasının ardından Stanford Üniversitesi'nde çekilmiş. Hofstadter'in 1950 yılında Princeton'dan Stanford'a geçişi, ihtiyaç duyduğu aletin, bir doğrusal hızlandırıcının rastlantısal biçimde kendisine sunulmasından kaynaklıdır. Böylelikle memnuniyetle enfes deneyler yapma olanağıyla yetinmeyip, aynı zamanda deneylerine temel oluşturan teoride de uzmanlaşmıştır.

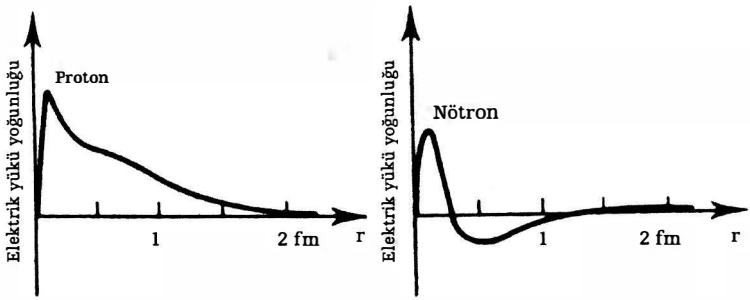
sayısına orantılıdır. Yüz nükleon içeren bir çekirdek, örneğin elli nükleon içeren bir çekirdeğin hacminden iki kat, yirmi beş nükleon içeren bir çekirdeğin hacminden de dört kat daha büyüktür. Ancak çekirdeğin yarıçapı hacmin küp köküne orantılıdır, bu yüzden hacim iki kat artınca yarıçap sadece yüzde yirmi beş artar. Yarıçap ile hacim arasındaki bu ilişki sayesinde ağır elementlerin çekirdeği hafif elementlerin çekirdeğinden aşırı ölçüde büyük değildir. Örneğin Uranyum–238 atomunun çekirdeği, tek bir protondan sadece yaklaşık altı kat daha büyüktür.

Çekirdekler konusunda son bir küçük gerçek de şudur: Bütün çekirdekler yuvarlak değildir. Bazıları futbol topu gibi yayvan; az sayıda diğerleri de, krep gibi yassılaşmış biçimlidir. Bu çekirdek içindeki bazı nükleonların göreli serbest hareketinden kaynaklanır. Bir nükleon çekirdek içerisinde olasılık dalgasının küresel olmadığı bir yörüngede dönüyorsa, bir bütün olarak çekirdek şeklini yörüngesindeki nükleonla eşleşecek şekilde kaydırmaktadır. İçinde çember çizerek dönüp duran bir deney faresinin olduğu bir balonu gözünüzün önüne getirin. Balonun şekli, farenin koşması için ona daha fazla alan sunacak şekilde bozulur.

9. Proton ve nötronun büyüklüğü nedir? İçlerinde ne vardır?

Proton hızlı dönüşüyle (*spin*) bir manyetik alan yaratan, yaklaşık 10^{-15} m (bir metrenin milyarda birinin milyonda biri) büyüklüğünde, pozitif elektrik yüklü bir toptur. Nötronun boyutları da hemen hemen aynıdır. O da kendi etrafında döner ve bir manyetik alan yaratır. Nötronun toplamda bir elektrik yükü yoktur, ancak tamamıyla yüksüz de değildir. İçinde birbirini dengeleyen pozitif ve negatif yükler vardır.

Proton ve nötronun içyapısının araştırılmasına dönük ilk adımlar Robert Hofstadter tarafından bir elektron hızlandırıcı kullanılarak 1950'lerin ortalarında Stanford Üniversitesi'nde atılmıştır. Hofstadter'in metodu kendisinden yaklaşık 45 yıl önce Ernest Rutherford'un kullandığı yöntemle büyük bir benzerlik taşıyordu. Rutherford, atomun içyapısını araştırırken



Şekil 6: Şekiller proton ve nötronun içerisindeki elektrik yükü yoğunluğunu parçacığın merkezinden uzaklığın fonksiyonu olarak gösteriyor. Yoğunluk birim hacim cinsinden değil, birim radyal uzaklık cinsinden ifade edilmiştir.

atomların üzerine ateşlediği alfa parçacıklarının sapmalarını ölçmüştü. Hofstadter de aynı şekilde nükleonun içyapısını çekirdeklerin üzerine yolladığı elektronların sapmalarını ölçerek tespit etmeye çalıştı. Rutherford'un alfa parçacıkları birkaç milyon elektron volt (MeV) enerjiye sahipti.[7] İlk deneylerinde temel olarak sadece şunu gördü: Atomun pozitif elektrik yükü, atomun içerisindeki küçük bir çekirdeğin derinliklerinde yer alıyordu. Hofstadter önce 600 milyon elektron voltla (600 MeV), sonra bir milyar elektron volttan (1 GeV) biraz fazlasıyla yaptığı deneylerde çok daha fazlasını tespit etti. Çekirdeklerin ve onların içerisindeki nükleonların boyutlarını ölçebilmekle kalmadı, ayrıca elektrik yük ve manyetizmanın nasıl dağıldığına dair de bilgi edindi. Şekil 6, proton ve nötronun içindeki elektrik yükü yoğunluğunu göstermektedir.

Daha sonra göreceğimiz gibi, her parçacığın bir dalga boyu (veya dalga uzunluğu) vardır. Parçacığın enerjisi ne kadar büyükse, dalga boyu o kadar az olur. Dalga boyu ne kadar küçükse de, ilgili yerin en saklı küçük kesimlerini araştırmak o derece kolay olur. Sıradan bir mikroskop ile görebileceklerimizin sınırı, mikroskobun kullandığı ışığın dalga boyu tarafından

7 Bir elektron volt (1 eV) elektronun hızlandırılması sonucu 1 voltluk potansiyel elektrik farkından kazandığı enerji miktarıdır. Parçacıklar dünyasında sıklıkla göreceğimiz genel birimler eV milyon (MeV) ve eV milyar (GeV), hatta bazen eV trilyon (TeV)'dir.

belirlenir. Bir elektron mikroskobu her zaman daha iyidir, çünkü onun elektronlarının dalga boyları ışığın dalga boyundan çok daha küçüktür. Stanford'un elektron hızlandırıcısı için de, çok büyük ve çok güçlü bir elektron mikroskobuydu diyebiliriz. Onun milyar voltluk elektronlarının dalga boyları tek bir protonun çapından daha az (ama *çok* daha az değil) idi, parçacığın içini aydınlatmaları da böyle mümkün oldu.

Bugün bizlerin proton ve nötronların içerisinde yer aldıklarını bildiğimiz kuarklar ise, Hofstadter'in gözleminden kaçmayı başardılar. Kuarklar temel parçacıklardandır, elektronlar gibi 1/2 birim spine sahiptirler ve yine elektronlar gibi bize fiziksel uzama sahip olmayan nokta parçacıklar olarak gözükmektedirler. Bu kitabın ileriki bölümlerinde kuarklardan bahsedeceğiz (*bkz.* Soru 45). Varlıkları deneysel olarak onaylanmadan önce bağımsız biçimde Murray Gell-Mann ve George Zweig isimli iki genç teorisyen tarafından öne sürüldü. *Kuark* adını da Gell-Mann'a borçluyuz.

Bugün kuarkların gerçekten var olduğunu gösteren bir veri zenginliğine sahip olmamıza karşın, aslına bakarsanız gerçekte bir kuarkı görebilmeyi halen başaramadık. Çıldırtıcı biçimde utangaçlar ve sürekli iki veya üçlük gruplar halinde kümelenmek istiyorlar. Ayrılamamalarının nedeni, aralarındaki çekim kuvvetinin birbirlerinden uzaklaştıkça (kütleçekim veya elektrik kuvvetine hiç benzemeyen biçimde) daha fazla güçlenmesi. Onları ayırmaya dönük her çabayı yine hiçbir kuark yalnız kalmayacak şekilde gerekirse yeni kuarklar yaratarak engelliyorlar. Çarpıcı bir benzeşim bir bilimkurgu filmindeki olayla kurulabilir. Beta ve Zeta ismindeki uzaylılar birbirlerine sıkıca sarılmışlardır. Rob ve Bob isimli dünyalılar onları ayırmak için olağanüstü bir kuvvet uygularlar. Sonunda, büyük çabalardan sonra başarılı olurlar veya başarılı olduklarını zannederler. Beta ve Zeta ayrıldığında yeni birer Beta ve Zeta ortaya çıkar. Yeni Beta kendini eski Zeta'ya, yeni Zeta da kendini eski Beta'ya bağlar. Tüm oflama poflamalarına karşın Rob ve Bob, Beta ve Zeta'yı ayıramamışlardır. Üstüne üstlük ellerinde bir yerine iki Beta-Zeta bileşimi vardır artık.

10. Planck sabiti nedir ve neden önemlidir?

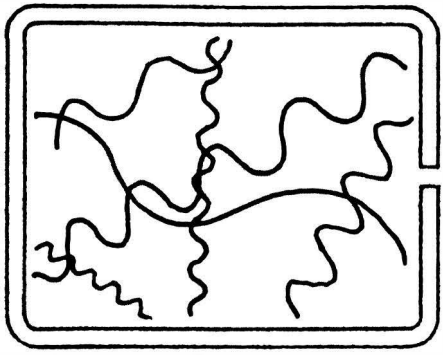
Max Planck adındaki Berlinli bir profesör 1900 yılında kuantum alanına girdiğinde muhtemelen bir devrimi başlatacağının farkında değildi. Planck, birazdan açacağımız *kovuk ışınımı* konusu üzerine çalışıyordu. Klasik fiziğin egemenliğinin doruk noktasında olduğu bir dönemdi ve fizikçiler mekanik, termodinamik ve elektromanyetizma gibi mükemmel teorilerin yardımıyla fiziksel dünya hakkında bu kadar çok şey bildikleri için kendilerini iyi - ben "kendini beğenmiş" demeye cesaret ediyorum - hissettikleri için mazur görülebilirlerdi. Klasik fiziğin büyük binasında tam emin konuşmayı engelleyebilecek olan birkaç küçük çatlak yok değildi; ancak fizikçilerin ezici çoğunluğu yine klasik fiziğin kullanımının bu çatlakları tamire yeterli olacağı kanısındaydılar. Örneğin neden atomların belirli ışık frekansları yaydığını kimse bilmiyordu. Yine yeni keşfedilen radyoaktivite olgusunu hiç kimse anlamış değildi. Bu iki problemin nasıl çözüleceğini kimse bilmediği için de klasik fiziğin açıklama için kullanılabileceğini varsaymak (veya ummak) hoş görülebilirdi. Aslına bakarsanız fiziğin yapısında sorun yaratan daha büyük bir zorluk sözkonusuydu, çünkü fizikçiler klasik fiziğin bunu açıklaması *gerektiğini* düşünüyorlardı. Kovuk ışınımının gizemi de burada saklıdır.

Her madde ısı derecesine bağlı bir frekans yoğunluğu ve erimiyle ışınım yayar. Güneş'te veya kamp ateşinde bu ışınım kolaylıkla görülebilir. Yeni ısınmaya başlayan bir elektrikli ısıtıcıda kızarıklık zor da olsa görülebilir. Yatak odanızdaki duvar için ise sözkonusu ışınım görünmezdir, çünkü zayıftır ve kızılötesi değildir. Yine de varlığı gün ışığı kadar kesindir. Şimdi yatak odasının yerine büyük bir kutu koyalım, kutunun çeperleri de (duvarları diyelim) odanın duvarlarıyla aynı sıcaklıkda olsun. Duvarlar sürekli olarak içe doğru ışın yayarlar ve yine sürekli olarak içlerine ışınım çekerler. Kutunun içinde – kovuk – değişik frekanslarda çok sayıda elektromanyetik dalga oradan oraya hareket eder. (Şekil 7) Kovuğun içerisindeki ışınım,

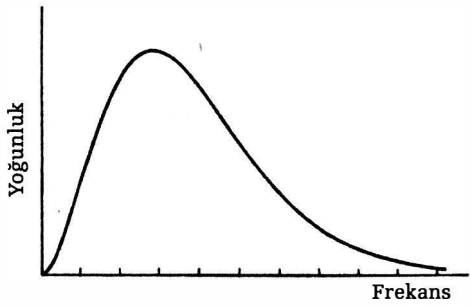
Max Planck (1858–1947) burada 1908 yılında elli yaşındayken görülüyor. 1914'de Einstein'ı Berlin'e davet etti ve ikisi beraber (Planck piyanoda, Einstein kemanda) müzik yapan birer arkadaş oldular. Planck'ın büyük oğlu Karl 1.Dünya Savaşı'nda öldürüldü, küçük oğlu Erwin, Hitler'e 20 Temmuz 1944'te düzenlenen suikasta adı karıştırılarak Ocak 1945'te Gestapo tarafından infaz edildi. Kabul etmesi belki de Erwin'in yaşamını kurtaracak olmasına karşın Planck, Nazi partisine katılmayı reddetti.

duvarların bileşimi veya kovuğun boyutları tarafından değil, yalnızca duvarların ısısıyla belirlenir. Planck'ın çalışmasının öncesinde de bu biliniyordu. Kovuk ışınımının yoğunluğunun frekansla bağlantısı Şekil 8'de gösterilmektedir.

Planck'ın çalışmasına dek, Şekil 8'de resmedilen yoğunlukların dağılımını açıklamak için gösterilen tüm çabalar tamamen başarısız oldu. Hatta klasik kuram saçma biçimde, kovuktaki ışınımın yoğunluğunun sonsuz olması gerektiğini öngördü. 1900 yılının sonbaharı sona ererken, önceki onca çabanın



Şekil 7: Işığın farklı frekans ve dalga boyları bir kovuğun içerisinde sıçrıyor.



Şekil 8: Kovuk ışınımının yoğunluğu

ardından kırk iki yaşındaki Planck en sonunda kovuk ışınımını açıklamayı başardı. Ancak bunu kendisinin "çaresizlik eylemi" diye nitelendirdiği bir yolla başarabilmişti. Kovuğun duvarlarındaki "rezonatörlerin" (titreşen elektrik yükleri) ışınımı kendisinin *kuanta* dediği paketçikler biçiminde yaymakta ve emmekte olduğunu varsaydı. Üstüne üstlük kuramında her paketçik –her kuantum– frekansıyla doğru orantılı bir enerji taşıyordu. Denklemini de kurdu:

$$E=hf$$

Burada E rezonatör tarafından yayınlanan niceliksel enerji paketi, f yayınlanan ışınımın frekansı (Hertz cinsinden, saniyedeki titreşim sayısı) ve h de Planck'ın önerdiği yeni sabittir. Yüksek frekanslı paketçikler, düşük frekanslı paketçiklere göre daha fazla enerjiye sahiptir. Planck h harfini yeni sabitini isimlendirmek için kullandı, o zamandan beri de kimse değiştirmeyi düşünmedi. Şaşırmayacağınız biçimde h, Planck sabiti olarak bilinmektedir. O kesitte kovuk ışınımı hakkında eldeki verilerle Planck'ın kendisi de h için doğru sayılabilecek yaklaşık değeri hesaplamayı bilmişti. Enerji için kullandığımız Joule ve frekans için kullandığımız Hertz cinsinden gündelik birimlerle karşılaştırınca h, *olağanüstü* küçük bir değer olan 10^{-33}'ten bile daha azdır.

Çevremizdeki dünyada hareket ve değişimin klasik fizikte hayal edildiği gibi düz ve sürekli değil, tanecikli ve "öbekli"

Araba plakam, benim kuantum fiziği aşkımın göstergesidir. H BAR nedir diye sordukları zaman, bazen New Mexico'daki sığır çiftliğimin adı olduğunu söylüyorum. Gerçekten de Idaho'da ismi BAR H BAR olan bir çiftlik vardır.

olduğu fikriyle Planck sabiti, fizikte tamamıyla yeni bir düşünüşün önünü açtı. Buna ek olarak rakamsal büyüklüğüyle küçük-ölçekli kuantum dünyasının ölçeğini belirledi. h'nin dünyamızdakinden çok daha büyük olduğu varsayımsal bir dünyada kuantum etkileri büyük ve aşikâr olurdu. h'nin dünyamızdakinden çok daha küçük olduğu başka bir varsayımsal dünyada, kuantum etkileri daha da küçük alanlarla sınırlanmış ve gündelik yaşamdan daha uzağa taşınmış olurdu. h'nin sihirli bir biçimde sıfıra indirildiği başka bir hayali dünya düşünün, orada da kuantum etkileri hiç olmazdı, tamamen klasik bir dünyada yaşıyor olurduk ve böylesi kitaplara da ihtiyaç kalmazdı. (Bu aynı zamanda kovuk ışınımının her şeyi kızarmış tost biçimine sokacağı bir dünya olurdu.)

Planck sabitine dair son bir söz daha edelim. Kuantum fiziğinin yirminci yüzyılın bu ilk dönemindeki gelişimi sırasında fizikçiler denklemlerinde h'nin 2π'ye bölünmüş olarak bulunduğunu gösterdiler. Örneğin atomun içindeki bir elektronun yörünge hareketinin dayanıklılığının (buna yörüngedeki açısal momentum diyoruz) $h/2\pi$, veya $2(h/2\pi)$, veya $3(h/2\pi)$ vb olduğu tespit edildi. Fizikçiler kısaltma biçimiyle $h/2\pi$'yi $\hbar$ olarak yazmaya başladılar; okunuşu ise *h bar*'dır.[8]

11. Foton nedir?

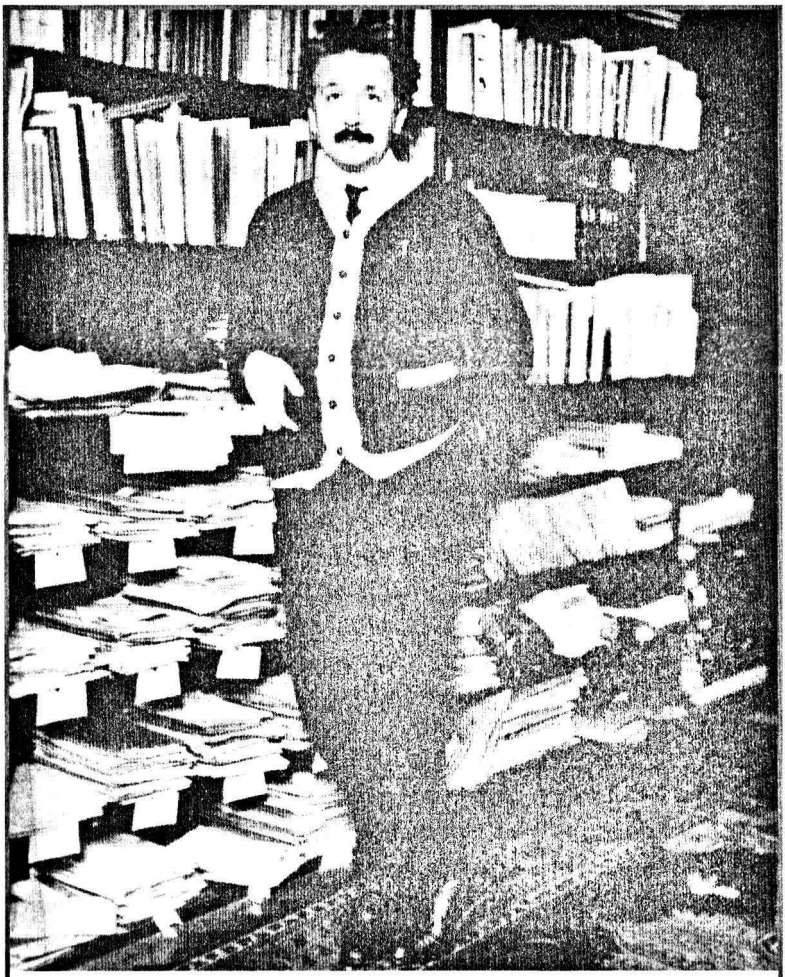
Albert Einstein'ın (özel ve genel) görelilik kuramlarını oluşturduğunu bilmeyen yoktur. Kuantum fiziğinin doğuşuna kat-

8 Yirminci yüzyılın ilk 35 yılı boyunca teorik fizikteki depremin merkez üssü olmuş olan Almanya'yı ziyaret ettiğinizde konu hakkında bilgili olduğunuzu göstermek istiyorsanız bunu *ha-strich* olarak okuyabilirsiniz.

kıları ise daha az bilinir. 1905'te, özel görelilik kuramını sunduğu – böylece uzayı zamanla ve kütleyi enerjiyle birleştirdiği – aynı yıl içerisinde Einstein, ışığın Planck'ın savladığı gibi sadece paketçikler halinde yayınlanıp soğurulmadığını, aynı zamanda paketçikler halinde *var olduğunu* söylüyordu. Başlangıçta fizikçiler bu elektromanyetik enerji kuantumlarını, *zerreler* olarak adlandırıyorlardı. 1926'da Gilbert Lewis *foton* adını önerdi ve bu kabul gördü.

Tıpkı elektron, proton, müon ve pionun parçacık olması gibi, *foton* kelimesinin sonundaki "-on" da bunun bir parçacık olduğu anlamına gelmekteydi. Aslında fizikçiler hemen kapıları açıp fotonu dört başı mamur bir parçacık olarak kabul etmediler. Bu direnç 1930'ların başına kadar, fotonların elektronlarla etkileşimi üzerine gayet başarılı bir kuram ona genel kabul kazandırana kadar sürdü. Başlangıçta fizikçiler bariz biçimde dalga özellikleri gösteren bir nesnenin parçacık olarak düşünülmesinde çok zorlandılar.[9] Dalga-parçacık, ikilik gibi kavramları kabul etmek zorunda kalsalar da, kütlesiz bir parçacığı hayal etmekte hep zorlandılar. Bugün fotonu elektron, nötron veya kuarktan "daha az parçacık" olarak görmüyoruz. Diğer parçacıklar gibi fotonun da enerjisi, momentumu, spini var, o da oluşturulabilir ve yok edilebilir. Yine de bir yönden farklılığı kuşku götürmez. Kütlesi olmadığı için hep aynı hızda hareket etmektedir. Diğer parçacıklar yavaşlatılabilir ya da durdurulabilir. Fotonda bu mümkün değildir. Oluşum anından başlayarak -enerjisi ne olursa olsun- her zaman herhangi bir nesnenin ulaşabileceği en yüksek hızda, doğanın hız sınırında, *ışık hızında* hareket eder.

9 1913 yılında Planck, Einstein'ın saygın Prusya Bilimler Akademisi'ne üyeliğini desteklerken şöyle diyordu: "Işık kuantumları üzerine olan hipotezindeki düşüncelerinde yanlış yola sapmış olma olasılığı ona karşı kullanılmamalıdır."



Albert Einstein (1879–1955) fotoğrafta 1920 yılında Berlin'de görüntülenmiş. Einstein Nobel Ödülü'nü alacağına öylesine emindi ki (1921'de aldı da), karısı Milena'yla 1919 yılındaki boşanma anlaşmasının bir maddesinde Nobel ödülünün iki oğlu için bir vakıf fonuna koyulacağını taahhüt etti. Daha sonraki Princeton yıllarında Einstein dağınık saçlı, sarkık kazaklı, uyumsuz çoraplı unutkan profesör rolünü oynadı.

12. Fotoelektrik etki nedir?

Metal bir yüzeye morötesi ışık verildiğinde yüzeyden kimi elektronlar açığa çıkar. Morötesi ışıktaki enerjinin bir bölümünün elektronlara geçtiği ve ardından elektronların metalden kurtularak uçabildikleri aşikârdır. Buna *fotoelektrik etki* denir. Bu etki Einstein'ın 1905'teki çalışması esnasında biliniyordu, ancak detayları bilinmiyordu. Elektronların sayısı ve enerjisinin nasıl gelen ışığın doğasına – özellikle yoğunluk ve frekansına – bağlı olduğunun saptanması gerekiyordu. Öne sürdüğü ışığın tanecik modelini kullanarak Einstein bu ayrıntıları tam bir kesinlikle öngördü. Kendisinin on altı yıl sonra Nobel'e layık görülmesi görelilikten değil, bu başarısından dolayı oldu.

Klasik bir bakışla, daha yoğun ışığın daha enerjik elektronlara neden olacağını ve bu ışığın – hangi frekansta olursa olsun– eğer yeterince yoğunsa, elektronları serbest bırakacağını öngörebilirdik. Ancak bu öngörülerin hiçbiri deneyle doğrulanamadı. Aksine elektronların enerjisinin ışığın yoğunluğuna değil sadece frekansına bağlı olduğu ve belli bir frekans limitinin altındaki ışığın – yoğunluğundan bağımsız olarak – hiç elektron çıkartmadığı ortaya çıktı. Einstein'ın ışığın tanecik modeli, fotoelektrik etki hakkındaki bu gerçekleri kolaylıkla açıklayabiliyordu. Işığın yayınımını bir foton seli olarak gözünüzde canlandırabilirsiniz (modern terminolojiyi kullanıyorum). Planck'ın formülü, $E=hf$ bize her bir fotonun enerjisini verir. Fotonun enerjisi bir bütün olarak elektrona geçebilir, ama küçük parçalara bölünemez veya foton yavaşladıkça yavaşça dağılamaz (*yavaşlayamaz*; ya hep ya hiç). Bir elektron bir fotonu soğurduğu takdirde fotonun tüm enerjisini kendisine aktarır. Bu enerjinin bir bölümüne elektron, metal yüzeydeki elektrik alan engelini aşmak için ihtiyaç duyar. Kalansa elektronun kaçışı için kinetik enerji olarak kullanılır. Belli bir frekansın –limit frekansı– altında, elektrona aktarılan enerji engeli aşmak için ihtiyaç duyulandan daha azdır, bu yüzden elektron kaçamayacaktır. Işık ne yoğunlukta olursa olsun hiçbir elektron kaçmak için gereken enerjiyi kazanamayacaktır. Ancak ışığın frekansı limit değerin üzerindeyse, fotonlar yeterli kaçış enerjisine sahip elektronların oluşumunu sağlayacaktır.

Ortaya çıkacak sayı ışığın yoğunluğuna bağlı olacaktır, ancak her birinin enerjisi sadece frekansa bağlıdır.

Amerikalı fizikçi Robert Millikan'ın 1916 yılında gerçekleştirdiği ölçümler Einstein'ın fotoelektrik etki üzerine öngörülerini parlak biçimde doğrular. Beş yıl sonra Einstein Nobel Ödülü'ne "Teorik fiziğe katkıları, özellikle de fotoelektrik etki yasasının keşfinden dolayı" layık görülecektir. (Alıntının ışığın kuantum doğasından hiç bahsetmiyor oluşuna dikkat ediniz). Daha sonra 1923 yılında Millikan da "temel elektrik yükleri ve fotoelektrik etki üzerine çalışmaları nedeniyle" Nobel ödülünde Einstein'a katılacaktır.

13. Hangi parçacıkların temel olduğu düşünülmektedir? Hangi parçacıklar bileşiktir?

Temel bir parçacığın tanımı basittir: Başka parçacıklardan oluştuğu bilinmeyen parçacıktır. Temel parçacıklar fiziksel uzama sahip değiller ve uzayzaman noktalarında etkileşime girmiyor gibi görünüyorlar. Bileşik (kompozit) parçacıklar - ismiyle de ilgili olarak - başka parçacıklardan oluşmaktadırlar. Fiziksel uzama sahiptirler ve çok küçük mekânsal alanlarda oluşturulur ve yok olurlar. Elektron, foton ve müon temel parçacıktır. Proton, nötron ve pion bileşik parçacıktır.

Fizikçiler yirmi üç temel parçacık tespit etmişlerdir. Bu yirmi üç temel parçacık sayısı içerisinde, karşı-parçacıkları, kütleçekim kuvvetinin varsayımsal taşıyıcısı graviton'u veya halen keşfedilmekte olan Higgs parçacığını (Soru 98) saymıyoruz. Yüzlerce bileşik parçacık bilinmektedir ve kaç tane olabilecekleri hakkında bir sınır yoktur (tıpkı doksan iki elementten üretilebilen kimyasal bileşkelerin sayısının sınırının olmaması gibi).

Parçacıklar kuantum fiziğinin ideal örnekleridir. Başka bir parçacıkla karşılaştıklarında, etkileşime geçtiklerinde, ışığı yaydıkları veya soğurduklarında, hareketin belli durumlarına kilitlendiklerinde veya bir durumdan diğerine geçtiklerinde, parçacıktan dalgaya dönüştüklerinde, biçim değiştirdiklerinde, tüm bu durumlarda parçacıklar olabilecek en yüksek ölçüde klasikten ayrılırlar. Bu yüzden bu kitapta kuantum fiziğini anlatmak için sıkça onlara başvuracağız.

Parçacık fiziği tarihini 1897'de Thomson'ın elektronu keşfi ile başlatabiliriz. Başlangıçta bu yeni alanda düşük bir tempoyla ilerlendi. 1930 yılında elektrona henüz sadece proton ve foton katılabilmişti. Ardından adımlar biraz hızlandı. 1940'da nötron ve birkaç mezon (daha sonra pion ve müon olarak tanındılar) partiye katılmıştı, nötrinonun ancak ipuçları vardı. 1940'ların sonunda alanın gelişimi, bazılarına *garip* adı verilen yeni parçacıkların keşfiyle hız kazandı. 1950'ler ve 1960'lar ise bir yeni parçacıklar seline sahne oldu.

Fizikçiler ancak o zaman, *basit parçacıklar* adını verdikleri parçacıkların tümünün basit olmayabileceği sonucuna doğru bir biçimde ulaştılar. Bazıları gerçekten temel parçacıklardı, çoğu ise bileşikti.

7. Bölümde parçacıklar ve özellikleri konusu üzerinde daha geniş duracağız. Burada bugün temel olduğu düşünülenler hakkında kısa bir özet sunmaya çalışırsak: Birinci olarak *leptonlar* adı verilen altı parçacık vardır: elektron, ağır müon, *çok* daha ağır tau ve – her biri elektron, müon ve tau tipinde – üç nötrino.[10] Elektron, müon ve tau negatif elektrik yükü taşımaktadırlar; nötrino yüksüzdür (nötr) ve ancak minik bir tutam kütleye sahiptir; kütlesi hafif elektronun kütlesinden bile çok daha azdır. Altı leptonun ortak özelliği çekirdeği bir arada tutan yeğin kuvvetten *etkilenmemeleridir*. Leptonlar zayıf kuvvetten ve eğer elektrik yüklenmişlerse, elektromanyetik kuvvetten etkilenmektedirler. Leptonlar Tablo A.1'de özetlenmiştir.

Altısı bitti, on yedisi kaldı.

Bunlardan sonra yeğin kuvvetten *etkilenen* altı parçacık gelir. Bunlar kuarklardır. Leptonlara benzer şekilde 1/2 birim spine sahiptirler, onlar da zayıf ve elektromanyetik kuvvetten etkilenirler. Özellikleri Tablo A.2'de özetlenmiştir. Tuhaf özelliklerinden biri, daha önceleri elektrik yükünün en küçük birimi olduğuna inanılan 1/3 veya 2/3 büyüklüğünde elektrik yükü taşımalarıdır. Ancak daha önce belirttiğimiz gibi kuarklar hep iki ya da üçlük ekipler halinde var oldukları için,

10 Fizikçilerin her şeyin bu üç "aileden" oluştuğu yönünde yabana atılamayacak geçerlilikte bir görüşü vardır. Bununla ilgili gerekçeleri Soru 42'de ele alacağız.

kesirli elektrik yüklü bir varlığın gözlemlenmesi mümkün olmamıştır.

Fizikçiler yaratıcılıktan yoksun biçimde ilk keşfedilen iki kuarkı *yukarı* ve *aşağı kuark* olarak adlandırmışlardır (sadece isimleri böyle, yönle ilgisi yok). Ardından da fantastik isimli *acayip* ve *tılsım* kuarklar geldi (evet *tılsım, tılsımlı* değil). Son olarak da *üst* ve *alt* kuarklar (Onlara *gerçek* ve *güzellik* adını vermek isteyen sıradışı fizikçilerin bunu başaramamasından dolayı her zaman üzüntü duymuşumdur).

On iki etti. Geriye kalan on bir temel parçacığa *kuvvet taşıyıcı parçacıklar* nadiren de *değiş-tokuş parçacıkları* adı verilmektedir. Özellikleri -varsayımsal graviton dâhil- Tablo A.3'te özetlenmektedir. Bu parçacıklardan biri, foton, elektromanyetik etkileşimin sorumlusudur. Bu parçacıklardan *W* ve *Z* olarak adlandırılan ikisi, zayıf etkileşimden sorumludur. Kuvvet taşıyıcılarla ilgili hayret verici bir gerçek de şudur: Dünyadaki her etkileşim leptonlar ve kuarklar arasındaki değiş tokuş sonucu ortaya çıkar. Buradaki *takas,* müdahil olan parçacıkların yok oluşu ve ortaya çıkışı anlamına gelir. Bundan sonra bir kişinin elini sıkacak olduğunuzda, bu teması mümkün kılmak için gereken atomik kargaşa aklınıza gelebilir.

14. Standart model nedir?

Yirmi üç parçacıktan oluşan dizilim, onların oluşturdukları bileşikler, yarattıkları üç etkileşim ve halen teorik bir parçacık olan Higgs, hep birlikte *standart modeli* oluşturmaktadırlar. Bu model ölümlü müdür, günü sayılı mıdır? Kimse bilmiyor. Günün birinde sicim teorisyenleri yarışı kazanacak olurlarsa, "yeni geliştirilmiş" standart model yirmi üç temel öğeden daha azına sahip olacaktır ve dördüncü etkileşimi, kütleçekim kuvvetini bünyesine katacaktır.

III. Bölüm

Küçük ve Çevik

15. Kuantum mesafe ölçekleri nelerdir?

Bir nanometre bir metrenin milyarda biridir (1 nm veya 10^{-9} m olarak yazılır). Nanometre atom ve molekül âleminde sık kullanılan bir birimdir. On hidrojen atomu omuz omuza dursalar 1 nm genişliğe erişirler. Aynı uzunluğa erişmek için dört veya beş su molekülü yeter. 10 ila 100 nm arası ebattaki devre veya yapılara nano-ölçekli diyoruz. Bu ölçek tam olarak kuantum ile klasik dünya arasındaki sınır çizgisi üzerindedir. Bazı X-ışınlarının dalga boyu yaklaşık 1 nm'dir. Gözümüzle gördüğümüz ışığın dalga boyu ise bundan yaklaşık beş yüz kat daha büyüktür (400 ila 700 nm aralığındadır).

Bu kitapta ele alınan olguların çoğu nano-ölçeğin epey altındaki boyutlarda gerçekleşmektedir. Nükleer dünyada sık kullanılan bir başka birim de femtometredir, bazen *fermi* diye adlandırıldığı da olur (her iki durumda *fm* diye kısaltılır). Nanometrenin milyonda biridir, 10^{-15} m olarak ifade edilir. 1.Bö-

lümde ele aldığımız nötron ve protonlar yaklaşık 1 fm genişliğindedirler ve çekirdekler, en büyükleri dâhil, 10 fm'den küçük yarıçaptadırlar.

Protonun bedenini bir bezelye büyüklüğüne yükseltebilseydik, içerisinde yer aldığı atomun genişliği yaklaşık bir mile ulaşırdı. Atomun içerisinde hakikaten büyük bir mekân sözkonusudur.

Hızlandırıcılardaki yüksek enerji deneylerinde araştırma konusu olan en küçük mesafeler yaklaşık olarak bir ferminin binde biridir (10^{-18} m). Bunun kesin olarak bildiğimiz en küçük mesafe olduğunu söyleyebiliriz. Kesin bilginin bu sınırı teorisyenleri çok daha kısa mesafelerin varlığını düşünmekten alıkoymamaktadır. Planck uzunluğu dediğimiz, yaklaşık 10^{-35} m veya tek bir protondan 100 milyar kere milyar kat daha küçük olan mesafede, sadece parçacıkların değil uzay ve zamanın da dalga ve olasılıkların kuantum dansına katılacakları öngörülmektedir (*bkz.* Soru 93). Amerikalı fizikçi John Wheeler tarafından uzayzamanın bu bulanık durumuna *kuantum köpüğü* adı verilmiştir.[11] Gerçekten varsalar, *sicimlerin* parçacık olarak gördüklerimizi üretmek için kıvrılarak titreştiği boyut da budur.

16. Bir parçacık başka bir parçacığı etkilemek için ne kadar uzağa "uzanabilir"?

Farklı kuvvetler farklı erimlere sahip olur. Tüm kuvvetlerin en zayıfıyla, kütleçekim ile başlayalım. Kütleçekim bizi dünyaya bağlar, bununla kalmaz insanlar âleminin çok ötesine erişir, Ay'ı Dünya etrafındaki yörüngesinde tutar, Dünya'yı da Güneş etrafındaki yörüngesinde tutar ve ayrıca galaksileri dönen dev çarklar olarak bir arada tutmayı başarır. Kütleçekim evrenin bir ucundan diğer ucuna uzanır. Kuantum yaklaşımı açısından bunları başarabilmesinin nedeni, kütleçekimin kuvvet taşıyıcısı veya "takas parçacığı" olan gravitonun kütlesinin sıfır olmasıdır. Bu onun -uzaklık arttıkça kuvvet azalmasına karşın- sınırsız uzaklıklara erişmesini sağlar.

11 Wheeler akılda kalan tabirleri bulmayı severdi. *Planck uzunluğu* ve *kara delik* kavramlarını da ona borçluyuz.

Sheldon Glashow (1932) fotoğrafta 1980'lerin başında geniş evren üzerine ders verirken görülüyor. Tahtadaki 2×10^{10} LY, evrenin o dönemdeki tahminle 20 milyar ışık yılı büyüklüğündeki yarıçapını simgeliyor. Glashow ve Nobel ödülünü paylaştığı çalışma arkadaşı Steven Weinberg, her ikisi de göçmen Yahudi ailelerinden gelmekteydiler, 1950'de New York'taki Bronx High School of Science'da ve 1954'te Cornell Üniversitesi'nde sınıf arkadaşıydılar. Dördüncü kuarkın ilginç ismi "tılsım"ı, Glashow'a borçluyuz. "Tılsım" Glashow'un makalelerinin bir araya getirildiği *The Charm of Physics*'te de tekrar karşımıza çıkacaktır.

Elektromanyetizmanın aracısı ise yine kütlesiz bir parçacık olan fotondur. Kütleçekim gibi o da –uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak kuvvet yitimi sözkonusu olsa da–, sınırsız bir uzama sahiptir. Büyük evrende önemli bir fark, astronomik cisimlerin fark edilecek büyüklükte bir net elektrik yüküne sahip olmamalarıdır; dolayısıyla birbirlerini -biri diğerini kütleçekimsel yönden çekiyor olsa da- elektriksel açıdan çekmez ve itmezler. Elektromanyetizma doğal olarak kütleçekimden çok daha yeğin bir kuvvet olmasına karşın, geniş evrende pozitif ve negatif elektrik yüklerinin birbirini götürmesiyle etkisi silinmektedir. Öte yandan atomun içerisinde elektromanyetizma kütleçekime fark atarak üstün gelmektedir – öylesine ki, kütleçekim atomik alanda tamamıyla göz ardı edilebilmektedir.

Abdus Salam (1926–1996) burada Rochester, New York'taki bir fizik konferansında 29 yaşındayken görüntülenmiş. Doktorasını İngiltere'de tamamladıktan sonra Salam, matematik profesörü olarak 3 yıl çalışmak üzere doğum yeri Pakistan'a geri döner. Daha sonraları Londra'da ders verdiği Imperial College günlerinden kendisinin sıcakkanlı yapısını ve tebeşir lekeli giysilerini hatırladığım Salam, gelişmekte olan ülkelerde fiziğin gelişimine katkıda bulunmuştur. Nobel Ödülü verilen tek Pakistanlıdır.

Peki, öyleyse proton ile elektron arasındaki elektriksel çekim atomun içerisinde kendisini nasıl göstermektedir? Fotonların salımı ve soğurulması yoluyla – kelimenin tam manasıyla var edilme ve ortadan kaldırılmalarıyla, her bir saniyede gerçekleşen trilyonlarca olayla - elektromanyetik kuvveti, tüm kuvvetler gibi, bir takas kuvveti haline getirerek...

Kütleçekim kuvveti ve elektromanyetizmanın dışında kütlesiz parçacıkların takasını içeren başka bir kuvvet daha vardır. Bu parçacıklar gluonlar ve sözkonusu kuvvet de yeğin kuvvet veya nükleer kuvvettir. Yalnız garip bir biçimde yeğin kuvvet, kütleçekim veya elektromanyetizma gibi uzak mesafelere erişmez. 1 fm civarında bir mesafeye mahkûmdur. Bu mesafenin protonun büyüklüğüyle aynı olması tesadüfî değildir. Proton (veya nötron) bu büyüklüktedir, çünkü gluonlar kuarkların bundan daha uzağa gitmelerine izin vermez. Yeğin kuvvet bu esnada mesafe artışıyla zayıflamaz, daha da güç kazanır. Kuarklar üzerinde çok sıkı bir kontrol uygular, öyle ki protonun içindeki üç kuark birbirlerinden uzağa doğru sürüklenmeye başlarlarsa, çok daha yeğin bir çekim kuvvetiyle geriye çekilirler.[12]

12 Burada bir incelik vardır. Protonun içerisine yeterince enerji akıtılırsa – diyelim ki bir hızlandırıcıdaki çarpışma yoluyla - kuarklar

Kuvvetler panteonunda dördüncü ve son kuvvet zayıf kuvvettir. Zayıflık, elektromanyetik kuvvet ve yeğin kuvvete göredir, yoksa kütleçekime oranla yine kuvvetlidir. Bu kuvvetin takas parçacıkları olan W ve Z parçacıkları kütleye, hem de *büyük* kütleye sahiptir. Protonun kütlesine oranla seksen kattan fazla ağırdır. Çok sayıda çekirdeğin radyoaktif bozunumundan (ve tekil protonun bozunumundan) sorumlu olan zayıf kuvvet çok kısa, ancak bir ferminin kesiri kadar bir erime sahiptir.

Fizikçiler her zaman doğanın tarifini kolaylaştıracak birleştirmeler peşinde koşarlar. Teorisyenler Abdus Salam, Steven Weinberg ve Sheldon Glashow tarafından 1960'larda başarılmasıyla herkesi memnun eden bir birleştirme, zayıf kuvvetlerle elektromanyetik kuvvetler arasındakidir. Oluşturdukları "elektro-zayıf" kuramdaki zayıf ve elektromanyetik etkileşimler[13] arasındaki çok önemli fark, takas parçacıklarının kütlesindedir. Bir takas parçacığı olarak kütlesiz foton, insan büyüklüğündeki boyutlara veya ötesine dek uzanabilmektedir (buluttan yeryüzüne düşen yıldırımı düşünün). Kütleli W ve Z takas parçacıklarının* uzanabildikleri mesafe bir tek protonun büyüklüğünden daha azdır. Feynman diyagramlarını işleyeceğimiz 9. Bölüm'de bu iki etkileşim arasındaki – parçacık oluşumu, yok oluşu ve takası düzeyinde daha da artan – benzerlikleri göreceksiniz. Her şeye karşın yine de önemli farklılıkları olduğu için halen sıkça farklı kuvvetler olarak adlandırılmaktadırlar. Zayıf etkileşim elektromanyetik etkileşime oranla sadece çok daha zayıf değil, aynı zamanda çok daha az bir uzama da sahiptir; dolayısıyla daha evrenseldir. Elektromanyetik kuvvetten etkilenmeyen yüksüz parçacıklar, yine de zayıf etkileşime girerler.

---

ayrılabilir; ancak bu sadece enerjinin bir bölümü yeni kuark/karşı-kuark çiftleri oluşturmaya harcanırsa ve böylelikle yeni bileşik parçacıklar oluşur ve bunlar ayrılırlarsa mümkün olur.

13 *Kuvvetler* ve *etkileşimler* kelimelerini aşağı yukarı eşanlamlı olarak kullanacağım.

* Bu parçacıklar varlıkları Salam, Weinberg ve Glashow tarafından öngörüldükten sonra keşfedildiler.

Steven Weinberg (1933). Weinberg, popüler olmuş ancak doğru olmayan, Harvard'dan Texas Üniversitesi'ne geçtiğinde kendisine en az futbol koçu kadar ödeme yapılmasını istediğini rivayet eden talihsiz ve yanlış bir hikâyeyle anılır. Weinberg sadece derin bir teorisyen değil, aynı zamanda *The First Three Minutes* ve başka kitaplarında görüldüğü gibi yetenekli bir yazardır.

17. Parçacıklar hangi hızla hareket eder?

Seçim hakkı olmayan bir parçacık vardır. Foton, kütlesiz bir parçacık olarak olabilecek en büyük hızla, ışık hızında hareket etmek zorundadır (ışık hızı için *c* sembolünü kullanıyoruz). Prensip olarak diğer parçacıklar yavaşlatılabilir veya durdurulabilir, ama pratikte daha çok fotonun hızından fazla aşağı olmayan bir hızla etrafta hareket ettiklerini görürüz. Uzaydan gelen kozmik ışın parçacıkları ışık hızına çok yakın bir hızla dünyaya ulaşırlar. Radyoaktif beta bozunumunda çekirdekten kopan elektronlar neredeyse aynı hızdadırlar. Stanford Doğrusal Hızlandırıcısı'nda elektronlar, saniyede 0,02 m hızla 299.792.458m/sn'lik ışık hızına itilirler. Atomun içinde elektronlar ışık hızının yüzde biri hızından başlayarak yüzde onu aşan hızlara ulaşacak şekilde hareket ederler.

Cüsseli varlıklar daha yavaş hareket eder. Olağan ısı derecesinde hava molekülleri yaklaşık 500 m/sn'lik ortalama hızla gezinirler. Savaş uçağı pilotları havadayken bu hıza ulaşıyor olsalar da, biz insanlar normalde bundan çok daha yavaş hareket ederiz. Yörüngedeki astronotlar ışıktan kırk bin kere daha yavaş, yaklaşık 7000 m/sn'de hareket ederler.

Görelilik teorisinin olağanüstü etkileri sadece ışık hızına yaklaştığımızda belirgin hale gelir. Günlük yaşamda bizler ve uğraştığımız nesneler ışıktan çok daha yavaştırlar, tıpkı kuantum etkilerinin farkında olmayışımız gibi, bu yüzden normalde görelilik etkilerinin farkına varmayız. Yine de gündelik olarak karşılaştığımız hızlar ışık hızından, mesela günlük mesafelerimiz ve zamanımızın atom-altı alandan farklılaşması kadar fazla farklılaşmaz. Muhtemelen çoğumuz okulda ışığın Güneş'ten bize ulaşmasının sekiz dakika sürdüğünü öğrenmişizdir. Işığı açtığımızda ortaya çıkan bariz anlık aydınlanmaya rağmen, ışığın astronomik alanda bir yerden bir yere ulaşmasının belli bir süre aldığını biliriz: Işığın Güneş dışındaki en yakın yıldızdan bize ulaşması dört yıl sürmektedir.

Dünya üzerinde ışığın (örneğin fiber optik yolla) herhangi bir yerden başka bir yere ulaşması saniyenin onda birinden az bir sürede gerçekleşir; bu Web'de sörf yaparken muhtemelen ayırdına varmadığınız bir süredir. Öte yandan 1969 yazında biz Dünyalılar ışık hızını (veya aynı anlama gelmek üzere radyo dalgalarının hızını) doğrudan idrak etmeyi başardık. Dünyadaki NASA kontrol merkezi ile Ay'daki astronotlar arasındaki konuşmayı izleyenlerimiz kontrol merkezindekilerin sorusu ile astronotun yanıtı arasında fark edilecek derecede bir zaman gecikmesi olduğunu gördüler. Bir saniyeden daha az süren normal insan reaksiyon zamanını aşan, radyo dalgalarının Ay'a ulaşıp dönmesinden kaynaklanan, fazladan iki buçuk saniyelik bir gecikme sözkonusuydu.

Işık hızı *gerçekten* doğanın hız sınırı mıdır? Böyle olduğuna inanmak için güçlü gerekçelerimiz var, ancak bilimde hiçbir şey mutlak değildir. Fizikçiler *takyon* adı verilen, ışıktan hızlı hareket eden (ve ışıktan *sadece* daha hızlı hareket edebilen) parçacıkların varlığı üzerine düşünme cesaretini gösterdiler. Takyonlar arandı, ancak bulunamadı. Sonuç olarak halen ışık hızı aşılmamış bir sınırdır.

18. Kuantum zaman ölçekleri nelerdir?

Gündelik yaşamımızda göz kırpmanın (belki saniyenin onda biri) çok kısa bir zaman olduğunu düşünürüz. Oysa atom-altı

alanda bu süre sonsuzluk gibidir. Bir saniyenin onda birinde elektron atomun çekirdeği etrafında 10 milyon kere milyar (10^{16}) kez dönebilir. Parçacık etkileşimleri için işe yarar bir zaman ölçüsü, ışığın protondan geçmesi için gereken yaklaşık 1 fm mesafelik süredir. Bu süre – parçacık saatinde bir tik olarak düşünebilirsiniz bunu – yaklaşık olarak bir saniyenin trilyonda birinin trilyonda birinin üç katı (3×10^{-24} sn) kadardır. Bu iki kuark arasında değişilen bir gluonun yaklaşık olarak yaşam süresidir. Fizikçilerin *en kısa* süre olarak düşündükleri zamanın bu olmadığını söylemeye gerek yok. Aynı "Planck uzunluğu" gibi, bir de "Planck zamanı" vardır. Bu ışığın bir Planck uzunluğunu geçmesi için gereken zamandır. Hayal edilemeyecek derecede kısa bir zamandır, yaklaşık 10^{-43} saniye. Bu, kütleçekim/kuantum iç içeliği ve kuantum köpüğünün gerçekleştiği zaman ölçeğidir.

Parçacıklarla bağlantılı tüm zamanlar yukarıda bahsettiğimiz kısalıkta değildir. Parçacıkların çoğu kararsızdır (radyoaktif) ve bunlardan bazıları da laboratuarda ölçülebilen bir mesafeyi geçebilecek kadar, hatta atmosferin yüksekliklerinden Dünya'nın yüzeyine ulaşacak kadar uzun yaşarlar. En uzun ortalama yaşama sahip olan[14] kararsız parçacık nötrondur, ortalama olarak on beş dakika yaşar.[15] Müonun iki mikro-saniyelik (bir saniyenin milyonda birinin iki katı) ortalama yaşamı bile parçacıkların çoğunun yaşamından uzundur. 10^{-10} saniyelik yaşam süreleri sıklıkla görülür, ancak bu kadar kısa bir yaşam süresi bile parçacığın birkaç santimetre hareket etmesine ve yok olmadan önce parçacık algılayıcısında iz bırakmasına yeter.

19. $E=mc^2$'nin anlamı nedir?

Brown hareketini açıkladığı, görelilik kuramını sunduğu ve fotonun varlığını öne sürdüğü yıl olan 1905 yılında Einstein bir kâğıda dünyanın en ünlü denklemi olacak olan $E=mc^2$'yi yazdı. Denklem enerjinin (E) kütleye (m) eşdeğer olduğunu söy-

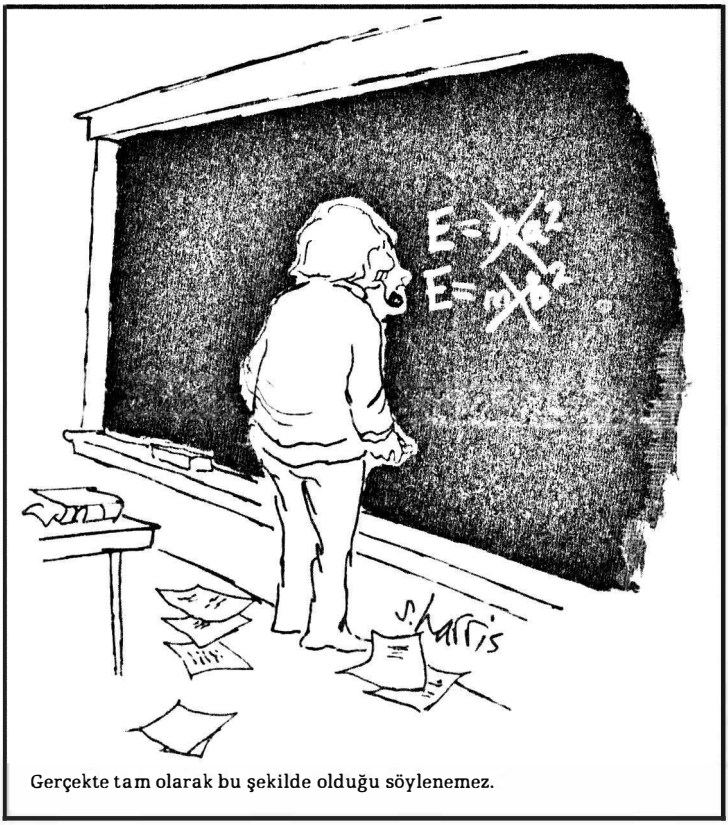
14 27. Soruda ortalama yaşamın anlamını ve yarı-yaşamla bağlantısını tartışacağız.

15 Çekirdeğin içerisindeki kararlı nötron sonsuza dek yaşayabilir.

lüyordu; bu yüzden eşitlik işareti vardı. Bu kütlenin enerjiye dönüştürülebileceği (nükleer bölünme ve birleşmede olduğu gibi) ve enerjinin kütleye dönüştürülebileceği (bir hızlandırıcıda yüksek enerjide parçacıklar birbirleriyle çarpıştırıldığında olduğu gibi) anlamına geliyordu. Hatta daha fazlası: Kütle ve enerji aslında aynı şeydi. Kütle katılaşmış enerjiydi ve enerji kütlenin tanımsal özelliği olan atalete sahipti. Enerji kütle*dir*. Kütle enerji*dir*.

Peki, öyleyse ışık hızının karesi (c^2) ne işe yarıyordu? Büyük bir parça maddenin hiç hareket etmemesi gerekir, ışık hızında ise kütle ve enerji sahibi olmak için çok daha az hareket etmesi gereklidir. Neden Einstein'ın denkleminde c^2'nin olduğunu açıklamak için önce sizi bir alışveriş mağazasına götürmeme izin verin. Metresi beş dolardan üç metre kumaş satın alacaksanız, ödemeniz gereken bedelin on beş dolar olduğunu bilirsiniz. Denklem biçimiyle B=SF: Ödeyeceğiniz bedel B, metre sayısı S ile metre başı fiyat F'nin çarpımına eşit olur. Bedel, metre sayısına *oransaldır*. Fikrinizi değiştirir ve iki kat fazla uzunlukta kumaş almaya karar verirseniz, ödemeniz gereken bedel iki kat daha fazla olur. Değişmeyecek olan (bu belirli malzeme için) F, metre başına fiyatıdır. F'ye *oransal sabit* denir. Metre sayısı S'yi, bedel B'ye dönüştürmektedir. Denklemin "özü" B'nin S'ye oransallığıdır, B ~ S diye yazılır. F sabiti, belli sayıda metreyi belli sayıda dolara dönüştürme işini yapar.

Benzer şekilde Einstein'ın denklemindeki c^2 oransal sabittir. Denklemin özü E'nin m'ye oransallığıdır: $E \sim m$. Burada c^2 sabiti, belli sayıda kilogramı (bir kütle birimi) belli sayıda Joule'e (bir enerji birimi) dönüştürme işini yapar. Günlük birimlerle karşılaştırıldığında c^2 *çok* büyük bir sayıdır: kilogram (kg) başına 9×10^{16} Joule. 10 m/sn hızla atılan bir kiloluk bir taş 50 Joule'lük bir kinetik enerjiye sahiptir, anlayacağınız kafanıza çarparsa yeterince hasar vermeye fazlasıyla yeter. Yine de halen bu taş içerisinde 9×10^{16} Joule'lük bir enerji – bir kütle enerjisi – saklı kalır, bu kinetik enerjisinden en az milyon kere milyar kat büyüktür. Daha bütünlüklü ifade edersek: 1 kg'lık kütle içerisinde saklı olan enerji Hiroşima'daki atom bomba-



Gerçekte tam olarak bu şekilde olduğu söylenemez.

sında serbest bırakılan enerjiden 1500 kat daha büyüktür. Bu patlamada 1 gramlık kütleden daha azı enerjiye çevrilmiştir.

Bu, kütlenin enerjiye dönüşümünün sadece nükleer alanda gerçekleştiği anlamına mı gelir? Hayır, bu bir kibriti yaktığınızda veya ateşe odun attığınızda ya da araç motorunuzun devrini arttırdığınızda da olur. Ancak bu durumlarda kütle kaybı ölçülemeyecek derecede azdır. Bugün bile hala kütle korunumu (kazanım ya da kaybın olmaması) kimyanın katı prensiplerindendir. Yine de en derin düzeyde bu yanlıştır! Her enerji bırakılışında (bir "ekzotermik" reaksiyonda) kütlede bir azalma olur. Her enerji kazanımında (bir "endotermik" reaksiyonda) kütlede bir artış olur.

c^2'nin enerji ve kütleyi birbirine bağlayan bir oransallık sabiti olduğu fikrini kavrasanız bile, yine de haklı olarak ışığın hızının kütle-enerji denkliğiyle ne alakası olduğunu sorabilirsiniz. Cevap görelilik kuramında ışık hızının uzay ve zamanı birbirine bağladığı gerçeğinden çıkışını alır (Hızın zaman birimi başına mesafe olduğunu gözden kaçırmayalım). Einstein eskiden apayrı olan uzay (diyelim ki, metreyle ölçülsün) ve zaman (saniyeyle ölçülsün) kavrayışlarını tek bir dört boyutlu uzayzaman düşünüşüne taşıdı. Eskiçağ bilimcileri bu birleştirmeyi yapmış olsalardı belki de saniyeyi (yaklaşık 300 milyon metrelik) bir mesafe birimi veya metreyi (yaklaşık 3 nanosaniyelik) bir zaman birimi olarak kabul edeceklerdi. Ancak bunu yapmadılar ve biz uzay ve zamanın farklı birimlerle ölçümüne sıkıştık kaldık. Bu ikisini tek bir dört boyutlu bütünlükte ifade etmek için zamanı ışık hızıyla çarpmak zorundayız. Böylece metre cinsinden ölçülen ct, x mesafesine tam bir eş olarak katılabilir. Şunu da belirtelim; görelilik kuramındaki diğer birleştirmeler de – kütlenin enerjiyle, momentumun enerjiyle, manyetik alanın elektrik alanla birleştirilmesi – her biri ışık hızını içeren oransallık sabitlerini gerektirmektedir. Kütle ve enerji için sabitin c değil de c^2 olmasının nedeni kaba ve basit bir yanıtla, kilogramı Joule'e çevirmek için (metre)^2/ (saniye)^2' yi çözmenin gerekmesidir.

Günlük yaşantımızda Joule kullanışlı bir birimdir. Kuantum dünyasında daha sık kullanılan birim ise 9. sorunun dipnotunda tanımladığımız, çok daha küçük bir birim olan elektron-volttur (*eV*). 1 eV 1,6 x 10^{-19} Joule'e eşittir. Katot-ışınlı TV tüpünde elektronlar ekrana yaklaşık 1500 eV'luk (1,5 keV) bir enerjiyle çarpar. Stanford Doğrusal Hızlandırıcısında elektronlar 50 GeV'luk bir enerjiye ulaşırlar. Fermilab Tevatron'da protonlar 1 TeV'a ulaşırlar. Rekoru şu an elinde tutan hızlandırıcı İsviçre'nin Cenevre kentinde bulunan CERN'in (Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire) Büyük Hadron Çarpıştırıcısıdır. Bu kitap kaleme alındığı sırada protonları 3,5 TeV'luk bir enerjiye itmişlerdi ve 7 TeV'a çıkmaları plan dâhilindeydi

(Çarpıştıklarında 14 TeV'luk bir toplam enerji edecek).[16] (14 TeV bile henüz 1 Joule'den çok daha azdır.)

Parçacık dünyasında c^2'yi göz ardı etmek ve kütleleri enerji birimleri cinsinden ölçmek yaygındır. Bu yüzden bir elektronun kütlesi 0,511 MeV, protonun 938 MeV ve bir üst kuarkın kütlesi ise yaklaşık (elektronun kütlesinden üç yüz bin kattan fazla olmak üzere) 172 GeV'dir denir. Böyle yapmak için iyi bir gerekçe sözkonusudur. Kütleden enerjiye ve enerjiden kütleye dönüşümler parçacıklar için olağandır. Kütle ve enerji sürekli kaynaşmaktadır. Kararsız bir parçacık bozunuma uğrasa örneğin, kütle enerjisinin bir bölümü bozunum ürünlerinin kütlelerine ve kalan da uçuşmaya başladıklarında kullanılacak kinetik enerjilerine gider. Başlangıçtaki enerjinin nasıl bölüştürüleceği bir parçacıktan diğer parçacığa büyük farklılıklar gösterir. Nötron bozunuma uğradığında kütlesinin yüzde 99,9'u ürün parçacıkların kütlelerinde görülür, öte yandan bozunuma uğrayan bir müonsa, kendisini kütlesinin sadece yüzde 0,5'i ürünlerin kütlelerinde gösterir. Parçacıklar hızlandırıcılarda çarpıştırıldıklarında ise kütle ile enerji arasında büyük dönüşümler olması kuvvetle muhtemeldir. Hızlandırılan parçacığın içerisine akan enerjinin büyük bir bölümü genellikle yeni kütle oluşturmaya gider.

Parçacık dönüşümünün bir çeşidinde kütlenin yüzde 100'ünün enerjiye dönüştürülmesi mümkün olmaktadır. Bir pozitron (bir karşı-elektron) bir elektronla karşılaştığında, her ikisinin kütle enerjisinin de tamamıyla kütlesiz fotonların kinetik enerjisine dönüşmesiyle, ikisi birden ortadan kalkabilir. Uzay Yolu dizisindeki kurgusal uzay gemilerinde tüketilebilir karşı-madde, geminin hareketi için ihtiyaç duyulan enerjiyi sağlıyordu. Ne yazık ki, böylesi bir hareketlendirici kuvvetin sağlanmasına dönük gerçekçi bir olasılık sözkonusu değil.

20. Elektrik yükü nedir?

Sizden belli bir kişiyi tarif etmeniz istense, onun özelliklerini uzun uzadıya anlatabilirsiniz. Edebi yeteneğiniz varsa aynı

16 Büyük ve küçük çarpanların kısaltma tablosu için *bkz* Ek B'deki Tablo B.1.

insan üzerine başlı başına bir kitap bile yazabilirsiniz. Ama bunun yerine elektronu tasvir eden bir kitap yazmaya karar verirseniz, bir veya iki sayfa sonra yazacaklarınız tükenir. Elektronun kütlesi (ve bu kütleye eşlik eden bir enerjisi) ve spini vardır. Bunlar onun mekanik özellikleridir. Bunlara ek olarak iki çeşit yük taşır: Elektrik yükü onun elektromanyetik etkileşiminin kuvvetini belirler, diğer bir çeşit yük de, zayıf etkileşiminin kuvvetini belirlemektedir. (Yeğin etkileşimli parçacıklarda *renk yükü* denilen bir çeşit yük daha vardır, ancak elektronlar bu yüke sahip değildir.) Burada -sıkça elektrik yükü yerine basitçe *yük* diye adlandırılan- elektrik yükünü ele alacağız.

Yükün sıradışı önemde iki özelliği vardır. *Öbeklidir* (*"kuantize"*, öbekler halinde gelir) ve *korunumludur* (toplam miktarı hiç değişmez). Elektrik yükünün birimi *e*, bir proton tarafından taşınan elektrik yükünün miktarıdır. Elektrik yükünü büyük ölçekli dünyada genellikle coulomb cinsinden ölçeriz. Coulomb adı, elektrik yüklü cisimlerde çekme ve itme kanunlarını ölçümleyen on sekizinci yüzyıl sonunda yaşamış bilim adamı Charles Augustin Coulomb'dan gelir. Elektrik yükünün kuantum birimi, coulomb'la karşılaştırıldığında –kibarca söylersek– çok küçüktür: e=1,6 x 10^{-19} C. (Tersinden söylersek 1 coulomb 6 milyar çarpı milyar sayıda elektronun yüküne eşittir.) Kuantum dünyasında genellikle *e*'yi birim olarak kullanırız. Bu birimi kullandığımızda, bir elektronun elektrik yükü -1'dir, alfa parçacığının +2 ve uranyum çekirdeğinin ise +92'dir. Daha önce gözlemlenmediğini belirttiğimiz kuarklar bu birim cinsinden ölçüldüklerinde kesirli yüklere sahiptirler: -1/3 ve +2/3 (karşı-kuarkların yükleri de +1/3 ve -2/3'dür).

Elektrik yükünün korunumu, Coulomb'un ölçümlerinden çok önce Benjamin Franklin tarafından öne sürülen bu yasa, tüm elektrik yükü işlemlerinde yükün toplam miktarının değişmediği anlamına gelir; elektrik yükü sonrasında da öncesiyle aynı kalır. Bu bildiğimiz kadarıyla her koşul altında geçerli olan mutlak bir korunum yasasıdır. Soru 53 ve 57'de bunun kimi sonuçlarına değineceğiz.

Elektrik yükü skaler bir niceliktir – bir diğer deyişle büyüklüğü vardır ancak yönsüzdür. Bu bir bileşik varlığın elekt-

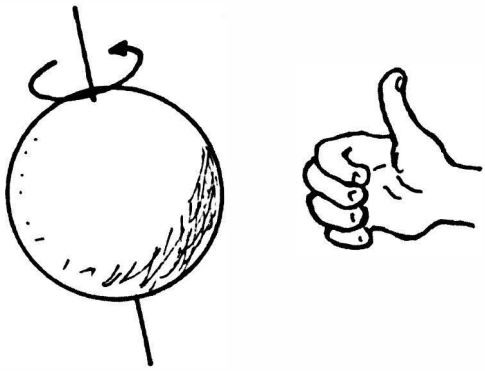
rik yükünün, basitçe bileşenlerinin yüklerinin sayısal toplamı olduğu anlamına gelir. Bu yüzden hidrojen atomunun yükü 1-1=0 olur. Uranyum atomundan iki elektron kopardığınızda geriye doksan iki proton ve doksan elektron kalır, net yük +92-90=+2 olur. +2/3 yükünde bir kuark +1/3 yüklü bir karşı-kuarkla birleştiğinde sonuç +1 yüklü bir pion olabilir. Elektrik yükünün korunumuna dair somut bir örnek verelim: -1 yüklü bir elektron ve karşı parçacığı olan +1 yüklü pozitron karşılaşıp yok olduklarında bir çift yüksüz foton ortaya çıkarırlar, net yük olaydan önce ve sonra sıfırdır.

Elektrik yükü *nedir*, peki? Kesin bir şey olduğunu söyleyebiliriz. Bu *je ne sais quoi* (ne olduğunu bilmediğimiz şeye) sahip olmanın parçacıkların birbirlerini çekme ve itmelerine neden olduğunu, bunun bazı durumlarda bir elektron ve bir protonun hidrojen atomunu oluşturmak için birleşmeleri cinsinden mutlu birlikteliklere vesile olduğunu, başka bazı durumlarda da koşuşturan bir alfa parçacığının atomik çekirdeğin yakınından geçmesi gibi yoldan sapmalara sebep olduğunu söyleyebiliriz. En önemlisi yük, parçacıkların foton yayınımı ve soğurulması gibi piroteknik olaylara katılımını sağlamaktadır. Yükün ne olduğunun özü budur. Yüklü parçacıklar fotonlarla "bağlanır". Madde ve ışınımı birbirine bağlar.

21. Spin nedir?

Hemen hemen herkes dönen (spin eden) bir topaç ve atlıkarınca görmüştür. Yine hemen herkes dünyanın kendi ekseni etrafında dönüşünü bir günde ve Güneş'in çevresinde dönüşünü ise bir yılda tamamladığını bilir. Aslına bakarsanız doğada dönmeyen fazla bir şey yoktur. Buz patencileri döner. Ay, Dünya'nın yörüngesinde ilerlerken kendi ekseni etrafında da döner (ancak her iki hareket de bir ayda tamamlanır). Galaksiler döner. Galaksi grupları da döner. Temel parçacıkların çoğunun dönmesi de şaşırtıcı olmamalıdır.

Dönme "miktarı" *açısal momentum* denen bir nicelikle ölçülür. Açısal momentum ne kadar kütlenin döndüğü, ne hızla döndüğü ve kütlenin dönme ekseninden ne kadar uzak

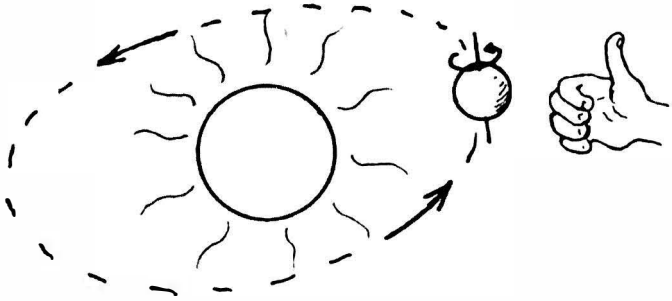


Şekil 9: Sağ el parmakları dönüş yönünü gösterirken, sağ el başparmağı açısal momentumun yönünü gösterir.

olduğuyla belirlenir. Buna *vektör niceliği* denir, çünkü sadece büyüklüğü değil yönü de vardır; yönden kastımız eksenin yönüdür ve "sağ el kuralı" ile belirlenir (Şekil 9).

Fizikçiler yörüngesel dönme ile spin dönmeyi (veya yörünge açısal momentum ile spin açısal momentumu) birbirinden ayırırlar. Dünya, günlük spini ve yıllık yörüngede dönmesi ile her iki çeşit için de bir örnek oluşturur (Şekil 10). Parçacıklar da hem spin eder hem de yörüngede dönerler. Elektronun – veya herhangi bir parçacığın – spini, parçacığın içkin bir özelliğidir. Artırmak veya azaltmak için hiçbir şey yapılamaz. Hep oradadır. Başka bir parçacık etrafında dönen yüklü bir parçacık ise sıfırdan - atomik standartlar açısından - çok büyük değerlere dek uzanan değişik miktarlarda yörünge açısal momentuma sahip olabilir. Hidrojen atomundaki bir elektron örneğin, hareketinin en düşük enerji durumunda sıfır yörünge açısal momentuma sahiptir ve hareketinin daha yüksek derecede uyarılmış durumlarına geçtikçe artan büyüklükte değerlere sahip olabilir.

Açısal momentum kavramsal olarak elektrik yükünden çok farklı olmasına karşın, yükün iki temel önemde özelliğini paylaşmaktadır. Öbekli ve korunumludur. Tarihsel açıdan yükün bir acayipliğini de paylaşır: En küçük değerinin ilk düşünüldüğünden daha da düşük olduğu ortaya çıkmıştır.



Şekil 10: Dünyanın hem yörünge, hem de spin açısal momentumu vardır.

Yük için sözkonusu kuantum tahmini kuarkların keşfiyle yapılmıştır. Açısal momentum için bu spinin keşfiyle mümkün olmuştur. 1913 yılındaki dönüm noktası özelliği taşıyan çalışmasında Niels Bohr tüm açısal momentumların Planck'ın sabitinin 2π'ye bölünmesine veya $h/2\pi$'ye eşit en küçük değerin tamsayı katı olduğunu varsaymıştı. Soru 10'da vurguladığımız gibi bu nicelik $\hbar$ olarak kısaltılmıştır ve h bar olarak okunur. Bundan bir düzine yıl kadar sonra iki genç Hollandalı fizikçi Samuel Goudsmit ve George Uhlenbeck atomik tayflarda (atomlarca yayınlanan ışığın düzeninde) var olan kimi bilmeceleri aydınlığa kavuşturdular. Çalışmalarında elektronun, hangi yörünge açısal momentuma sahip olursa olsun buna ek olarak (1/2) $\hbar$ büyüklüğünde bir içkin spine sahip olduğunu öne sürdüler. Bugün yörünge açısal momentumun Bohr'un öngördüğü gibi her zaman $\hbar$'nin (veya 0'ın) tamsayı katı olduğunu ve spin açısal momentumun en küçük değerinin Goudsmit ve Uhlenbeck'in önerdiği gibi (1/2)$\hbar$ olduğunu biliyoruz. $\hbar$'nin spin açısal momentumun birimi olması bugün genel kabul görmüştür. Böylece elektron ve kuarkların 1/2 spine, fotonlar ile W ve Z parçacıklarının 1 spine ve varsayımsal gravitonun 2 spine sahip olduğunu söyleyebiliyoruz. Pionlar ve varsayımsal Higgs gibi 0 spinli parçacıklar da vardır.

Açısal momentumun korunumu, tahmin edebileceğiniz gibi, değişimin tüm süreçlerinde toplam açısal momentumun süreçten öncesi ile aynı olması anlamına gelmektedir. Bunun

pratikte nasıl işlediğini görmek için farklı açısal momentumların toplam açısal momentumu oluşturmak için nasıl toplandığını bilmeniz gerekir. Basitçe büyüklükleri toplamak elektrik yük (skaler bir nicelik) için iş görür belki ama bu açısal momentumda (vektörel bir nicelikte) olmaz. Dahası kuantum dünyası daha büyük bir ustalığı gerektirir, çünkü iki veya daha fazla açısal momentumun toplamının kuantum yasalarıyla uyumlu bir büyüklüğe sahip olması gerekir. Klasik dünyada doğu yönünde 1 büyüklüğünde bir vektörü, kuzey yönünde 1 büyüklüğünde bir başka vektörle toplayarak kuzeydoğu yönünde 1,41 büyüklüğünde bir vektör elde edebilirsiniz. Üstüne üstlük bu iki vektör yönlerine bağlı olarak 0 ila 2 arasındaki herhangi bir toplama eklenebilir; sonsuz sayıda olasılık sözkonusudur. Kuantum dünyasında bu mümkün değildir. Her biri ($\hbar$ birimi cinsinden) 1 büyüklüğünde olan iki açısal momentum, sadece 0, 1 ve 2 büyüklüğündeki üç olası toplama eklenebilir. 1 birimlik yörünge açısal momentuma ve 1/2 içkin spine sahip bir elektron sadece iki olası toplam açısal momentum değerine sahip olabilir: 1/2 veya 3/2.

Bir değişim sürecinde açısal momentum korunumuna bir örnek verelim: Bir elektron ve bir pozitron düşünün. Yörünge açısal momentumları sıfır olacak şekilde birbirlerine dönük herhangi bir yörüngesel harekete sahip olmasınlar ve toplam spin açısal momentumları da sıfır olacak şekilde zıt yönde spinleri olsun. İki foton meydana getirmek için yok olduklarında, fotonların toplam açısal momentumu da, yok olma olayından öncesi gibi yine sıfır olmak zorunda. Fotonların her ikisi de 1 spine sahip olduğu için, bu iki spinin birbirlerine karşıt yönde olmak zorunda olduklarına hükmedebiliriz. Ancak o zaman spin 1 artı spin 1 sıfıra eşit olabilir.

Açısal momentumları birleştirme konusunda eksik bir yön kalmaması açısından belirtmemiz gereken bir ince kural daha vardır. Üç maddeli bir kural: **(1)** Tamsayılı açısal momentumlar (0, 1, 2, 3, vs) birleştiğinde, sonuç da tamsayı bir açısal momentum olur. Bu yüzden 2 veya 3 – başka olasılıkların yanı sıra – 1, 4 veya 5 sonucunu verebilir. **(2)** 1/2'nin tek tamsayı katı (1/2, 3/2, 5/2, vs) değerindeki açısal momentumlar bir tamsayı

açısal momentumla birleştiğinde, sonuç 1/2'nin tek tamsayı katı açısal momentum olur. Örneğin 1/2, 2 ile birleşince sonuç 3/2 veya 5/2'dir. (3) Son olarak iki tane 1/2 'nin tek tamsayı katı açısal momentum birleştiğinde, sonuç bir tamsayı açısal momentumdur. Buna bir örnek olarak elektron-pozitron birleşmesi verilebilir, her ikisinin 1/2 spini vardır, toplam spin açısal momentumu sonuç olarak sıfır veya 1 olur.

Atom-altı dünyada sık kullanılan büyüklük ve ölçüm birimleri için *bkz.* Ek B'deki Tablo B.2.

IV. Bölüm

Kuantum Öbekler ve Kuantum Sıçramalar

22. Neler öbeklidir, neler değildir?

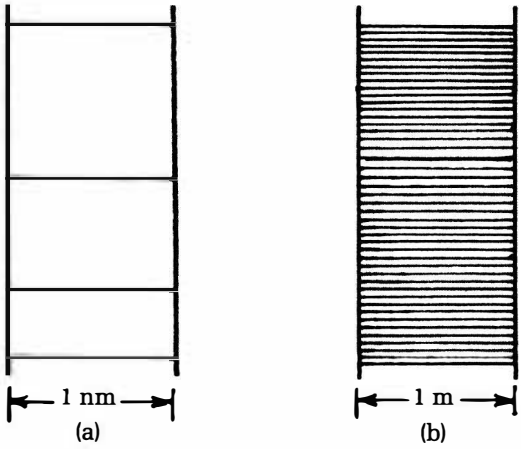
Parçacıkların içkin özelliği – neredeyse tanım gereği – öbekli (bir diğer deyişle kuantize) olmalarıdır. İçkin özellikler olarak parçacığın kütlesini, elektrik yükünü, spinini ve bunların yanında lepton sayısı, baryon sayısı, renk yükü gibi henüz ayrıntılı ele almadığımız başka kimi özelliklerini de sayabiliriz. Parçacığı karakterize eden ve tüm doğasını tamamıyla değiştirmeksizin değiştirilemeyecek olan her şey öbeklidir. Öte yandan parçacığın serbest hareketiyle ilgili özelliklerse öbekli değil, düzdür. Serbest hareket eden bir parçacık herhangi bir hız, momentum veya kinetik enerjiye sahip olabilir. Bir otomobil düşünün. Otomobilin dört tekerleği "öbeklidir", tıpkı parçacığın kuantize özellikleri gibi. Arabanın üç-tam-bir-bölü-üç veya dört buçuk tekerleği olmaz. Şimdi tabii siz, ben üzerinde çalışırsam üç tekerleğe indiririm veya altı tekerleğe çıkartırım arabayı, diyebilirsiniz. Mümkündür, ancak elde ettiğiniz sonuç

orijinal arabayla alakası olmayan başka bir araç olur. Bu elektronun yerini müonun almasına benzer. Yeni bir varlığa sahip olursunuz. Ayrıca siz elden geçirdikten sonra bile tekerleklerin sayısı tamsayı olur, kesirli sayı değil. Elden geçirseniz de geçirmeseniz de araç yolda herhangi bir hızda, herhangi bir uzaklığa gidebilir vs Hız ve uzaklık onun "düz" (*kuantum-olmayan*) sıfatları olur.

Hareket sınırlanmışsa – atomdaki elektron veya çekirdekteki proton için olduğu gibi – bu hareketle ilişkili kimi özellikler de kuantize olur. Atomdaki elektron sadece belirli bir kütle, yük ve spine sahip olmakla kalmaz, aynı zamanda hareket enerjisi ve yörünge açısal momentumu da öbeklidir. Soru 66'da elektronun dalga doğasının hapsedilme bağlamında öbeklilik özelliğini ele alacağız. Bu arabanızın açık yolda herhangi bir hıza çıkabilmesine karşın, oval yarış pistinde yarışırken sadece belli hızlara mahkûm olmasına benzer.

Genel kural hapsedilmiş (ister tek bir parçacığa, isterse parçacığın hareketinin sınırlandığı küçük bir alana olsun) tüm özelliklerin öbekli veya kuantize; hapsedilmemiş özelliklerin (serbest hareket eden bir parçacığın hızı gibi) düz olması veya kuantize olmamış olmasıdır. Şimdi burada bir incelik devreye giriyor. Hiçbir parçacık *gerçekten* özgür değildir. Hareketinde her zaman *bazı* sınırlar sözkonusudur. Bu, parçacıkların *tüm* özelliklerinin kuantize olduğu anlamına mı gelir? Prensipte, evet. Pratikte, hayır.

Oturma odanızdaki havanın içindeki, oda duvarlarına hapsolmuş bir oksijen molekülünü düşünün. Molekülün sıkça diğer moleküllerle çarpışmasını göz ardı ederek bir fizikçi molekülün izin verilen (kuantize) enerjilerini hesaplayabilir (Şekil 11). Bir izin verilen enerji ile diğeri arasındaki farkı söylemenin pratikte olanaksız olacağı şekilde sonuçların birbirine yakın oldukları görülür. Komşu enerji değerleri arasındaki ardışık sıçrama, pratikte enerjinin düz varyasyonundan ayırt edilemez. Pratik amaçlar açısından enerji değerlerinin kuantize olması fark yaratmaz. Klasik fizik molekülün hareketini açıklamak açısından iş görür durumdadır.



Şekil 11: Birbirlerinden (a)1 nanometre (b)1 metre uzaklıktaki iki duvar arasında hapsedilmiş bir molekül için enerji düzeyleri. Pratikte (b) şeklindeki düzeyler ayırt edilemez.

Büyük ölçekli dünyadan bir örnek daha verelim. Diyelim ki Junior'ın futbol maçına gittiniz, saha kenarındasınız, top atıldı ve topun atıldığı yöne dönerek Junior'ın sahadaki koşusunu izliyorsunuz. Döndüğünüz için açısal momentumunuz olur ve en küçük değer $\hbar$'ın tamsayı katı bir değer alır. Ama nasıl bir tamsayı; belki de bir milyar kere trilyon kere trilyon katı (10^{33})! Bir fizik öğrencisi olarak daha yavaş dönerseniz – çok çok daha yavaş – açısal momentumunuzu düşürerek onun kuantum karakterini görünür kılabileceğinizi düşünürdünüz değil mi? Umutsuz bir çaba olurdu bu tabii. Klasik dünyanıza sıkışmış kalmış durumdasınız çünkü. Bedeninizi sabit tutarak sadece başınızı çevirseniz ve başınızı soldan sağa çevirmeniz bir saat sürse bile, açısal momentumunuz yine de $\hbar$ değerinden trilyon kere trilyon kat büyük olacaktır. Açısal momentumunuzu 1 kuantum birim artırma veya azaltmanız ve aynı zamanda bunu ölçebilmeniz mümkün değildir.

Verdiğimiz bu örneklere karşın büyük ölçekli dünyada kuantum etkilerinin hissedildiği durumlar da sözkonusudur. Bunlardan biri olan süper iletkenlikten Soru 2'de bahsetmiş-

tim. Olağanüstü bir pratik anlama sahip olan başka bir tanesi de, metallerde elektronların davranışıdır. Bir metalde tekil atomlara bağlılıktan kurtulmuş, malzemenin sınırları içerisinde dolaşma özgürlüğüne sahip çok yüksek sayıda elektron sözkonusudur. Yukarıda örnek verdiğimiz oturma odasındaki oksijen molekülüne benzer biçimde, her elektron birbirine çok yakın belirli enerji değerleriyle sınırlanmıştır. Olası enerji değerlerinin sayısı olağanüstü yüksektir, ancak elektronların sayısı da olağanüstü yüksektir. 25. soruda ele alacağımız dışarlama ilkesi uyarınca sadece iki elektron (spinin iki olası yönüne karşılık gelecek şekilde) bu enerji değerlerinden herhangi birisini alabilir. Anlayacağınız, elektronlar giderek daha yüksek enerji durumlarına oturarak "kümelenmektedir". İzin verilen bitişik enerjiler arasındaki aralık bir elektron voltun minik bir kesri olsa da, "küme"nin tepesindeki elektronlar birkaç elektron voltluk enerjiye sahip olurlar. Dışarlama ilkesi sayesinde "el üstünde tutulan" bu enerjik elektronlar metalin elektriği iletme yeteneğinin nedenidirler.

23. "Hareket durumu" nedir?

Klasik dünyada bir nesnenin hareketini belirtmek için onun nerede olduğunu, ne hızla ve ne yönde hareket ettiğini söyleriz. Cep telefonunuzu açar, bir arkadaşınızı arayarak "Dinle, hareket durumum şu: 45. Cadde ile Madison'ın kuzeybatı köşesindeyim, Madison'ın kuzeyine doğru saatte iki mil hızla yürüyorum" diyebilirsiniz. Arkadaşınız bu işlerle alakalı biriyse sizin momentumunuzu ve kinetik enerjinizi hesaplayabilir. Kuantum dünyasındaysa böylesi belirlilikler olmaz. Parçacığın yeri tam olarak belirlenemez, hızı ve hareketinin yönü de aynı şekilde. Fakat her şey o kadar bulanık da değildir. Parçacığın hareketinin belirli "küresel" özellikleri tam olarak saptanabilir, örneğin enerjisi, açısal momentumu ve hatta spin ekseninin yönü gibi. İşte bu küresel özellikler *hareket durumunu* tanımlamaktadırlar. Büyük ölçeğe geri dönersek, bu sizin arabanızdan arkadaşınızı arayarak şunları bildirmenize benzer: "Dinle, hareket durumum şu: Upper East Side'da iki blokluk bir alanda saatte ortalama on mil hızla park yeri arayarak dönüp duruyorum."

Hareket durumu kavramını Niels Bohr'a borçluyuz. Bohr 1913'te hidrojen atomu üzerine gerçekleştirdiği ünlü çalışmasında "sabit hareket" fikrini öne sürdü. *Sabit* (stationary) sözüyle hareketsiz olmayı kastetmiyordu. Ona göre hareketin enerji ve açısal momentum gibi belirli özellikleri, elektron bu hareket durumunda olduğu müddetçe -bu uzun veya kısa sürebilir ayrı konu- değişmez. Ancak Bohr'un anlatımında elektron bir hareket durumundan diğerine sızmıyordu. Elektron birden başka bir hareket durumuna sıçrayıncaya dek özellikleri değişmeden kalıyordu.

Bohr aynı zamanda atomda (ve bizlerin bildiği üzere çekirdek içerisinde veya başka herhangi bir sınırlanmış sistemde) bir en düşük enerji durumu olduğunun farkına vardı. Buna *taban durum* diyoruz. Bu durumdaki bir parçacığın enerjisi olmasına karşın, bu kullanılmayan faydasız enerjidir. Buna *sıfır-noktası enerjisi* de denmektedir, bir sistemin tüm olası enerjisi tüketildikten sonra halen sahip olduğu enerjidir. Mutlak sıfır sıcaklığa taşınan bir nesnenin sıfır-noktası enerjisi dışında bir şeyi kalmaz. Sıfır-noktası enerjisi sayesinde daimi hareket dediğimiz şey de mümkün olur.

Bohr bir atomun taban durumunda değilse daha enerjik bir durum olan "uyarılmış durum"da olduğunu tespit etti. Uyarılmış durumu basitçe taban durumundan daha çok enerjili tüm hareket durumları olarak tanımlayabiliriz. Verili bir atomda aslında sonsuz sayıda uyarılmış durum sözkonusudur. Böylesi ilk birkaç durum taban durumundan açık biçimde ayrılır; farklılıkları açıkça bellidir. Bu kuantum doğalarının açıkça belli olduğu anlamına gelir. Enerji arttıkça durumlar giderek birbirine daha da yakınlaşarak kümelenir ve en sonunda bir "süreklilik" (continuum) gibi görünürler; anlayacağınız klasik olarak öngörülene benzerler (*bkz.* Soru 3).

Maddenin dalga doğası, hareketin sabit durumlarının neden var olduğunu açıklamamıza yardımcı olur. Şimdilik dalgalar ve sabit durumlar arasındaki ilişkiye dair acele bir tanım getirmekle yetinelim. (Bu fikri Soru 67'de genişleteceğiz.) Bir piyanonun veya harpın tellerinin veya flütteki ve borazandaki hava kolonunun, tümünün belirli frekanslarda titreşerek sesin

özgün tonlarını yaydıklarını biliyoruz. Özgül olarak borazanı ele alalım. Borazancı borazana farklı dalga modelleri kurar, çeşitli biçimlerde üfleyerek çeşitli tonlar üretebilir. Her ton aslında müziksel bir "sabit durum"dur. Borazancı başka tonlar çıkartamaz. Belirli titreşimlerin izin verdiği tonlarla sınırlanmıştır. Benzer biçimde atomdaki bir elektronla ilişkilenmiş bir dalga sadece belirli biçimlerde titreşebilir ve bu izin verilen titreşimler sabit durumları sağlar.

Aslında borazan hidrojen atomuna şaşırtıcı biçimde benzer. Borazanın yayabileceği en düşük ton, diğer deyişle "taban durumu" diyebileceğimiz bir durum da sözkonusudur. İkinci tonu ilkinden açıkça ayrılmıştır, üçüncü tonu ikinciden biraz daha az açıklıkta ayrılmıştır. Borazancı yüksek perdelere çıkan sesler çıkardıkça, bunlar müzikal ölçekte giderek daha fazla birbirine yaklaşır. Tıpkı hidrojen atomundaki daha yüksek derecede uyarılmış durumların enerjilerinin birbirlerine giderek daha yakın hale gelmesi gibi.

24. Uyarılmış hareket durumundaki bir hidrojen atomu farklı durumdaki aynı atom mudur, yoksa başka bir atom mudur?

Bu ince ve derin bir soru. Kitap boyunca sizlerden kimi yerlerde kemerlerinizi bağlamanızı isteyeceğim. Burası da öyle bir yer.

Muhtemelen sorumuza yanıtınız şöyle olur: "Uyarılmış durumdaki bir atom hala aynı atomdur tabii ki. Enerjisi değişti, bunun sonucunda kütlesi de çok az değişti, ama aynı proton etrafında aynı elektron dönüyor hala." Bundan farklı olabileceğini tartışmak evinizi boyayıp sonra buna farklı bir ev demek gibi bir şeydir. Uygulamacı fizikçi ve kimyagerlerin çoğu aslında uyarılmış atomu aynı atomun farklı bir durumu olarak ele almakta sizinle hemfikirdir. Böyle baktığınızda her şey yolunda gözükmektedir. Kullanışlıdır da. Yine de, en derin düzeyde, *özelliği bir diğer varlıktan farklılaşan her varlık ayrı bir varlıktır*. Kuantum fiziği ilkesel olarak (1) daha yüksek enerji durumundan daha aşağısına sıçrarken bir foton yayan atom ile (2) kendisini müona dönüştürürken bir nötrino ya-

yan pionu birbirinden ayırt etmez. İkinci bahsedilen süreç açısından herkes pion, müon ve nötrinonun ayrı parçacıklar olduğu ve içlerinden biri ortadan kaybolduğunda (yok olduğunda) diğer ikisinin göründüğü (var olduğu) hususunda hemfikirdir. Kuantum fiziğinin mantığı ne kadar kullanışlı ve "açık görünüyor" olsa da, hidrojen atomunun -biri foton yayınlandıktan önce diğeri sonra olmak üzere- iki durumda olduğunun reddini gerektirir. Gerçekte atomun uyarılmış durumu, atomun taban durumu ve fotonun üç ayrı varlık olduklarını ve uyarılmış atom kaybolduğunda (yok olduğunda) taban durumu atomu ve fotonun göründüğünü (var olduğunu) kabul etmeliyiz.

Daha katı ifade edersek, kuantum fiziği bizim bir hidrojen atomunun bir proton ve bir elektrondan "oluştuğunu" söylememize bile izin vermez. "Pion için, bir müon ve bir nötrinodan oluşur" diyebildiğimiz kadar, hidrojen atomu için de bir proton ve bir elektrondan oluşur diyebiliriz. Varsayımsal olarak boş bir kutuya bir proton ve bir elektron koyarsanız bir süre sonra kutuda bir hidrojen atomu oluşabilir. Bu atomun kütlesi orijinal parçacıkların kütlesinin toplamına eşit olmayacaktır. Bundan biraz daha düşük olacaktır. Bir hidrojen atomunun içerisindeki bireysel parçacığın - proton veya elektron - kütlesini ölçmek ilkesel olarak mümkün değildir. Atom yeni bir varlıktır. Sizler bunu anlaşılır nedenlerle saçınızı ortadan ayırmak cinsinden, dünyanın düzensiz bir görünümü olarak düşünebilirsiniz; bunu içerisinde yürüyen bir insan olduğunda bir ev, ev artı insan olmaz, tamamıyla bambaşka bir varlık olur demeye benzetebilirsiniz. Kuantum fizikçisi bunu "evet, başka bir varlık olur" diye yanıtlamak durumundadır. Fizikçimiz sizden varsayımsal bir boş kutuya bir müon ve bir nötrino koyduğunuzu düşünmenizi isteyecektir. Bir süre sonra kutuda bir pion olabilir. Bu durumda pionun bir müon ve bir nötrondan oluştuğunu söylememiz için çekici bir neden yoktur, çünkü kütlesi diğer iki parçacığın kütlelerinin toplamından epey farklıdır, çarpıcı biçimde ayrışan başka özellikleri de sözkonusudur. İçinde bir insanın yürüdüğü evin bir ev artı bir insan değil, tamamıyla başka bir şey olduğunu söylemek sağduyumuza meydan oku-

maktadır, ancak kuantum fiziğin sağduyuyla cepheleştiği tek örnek de bu değildir.

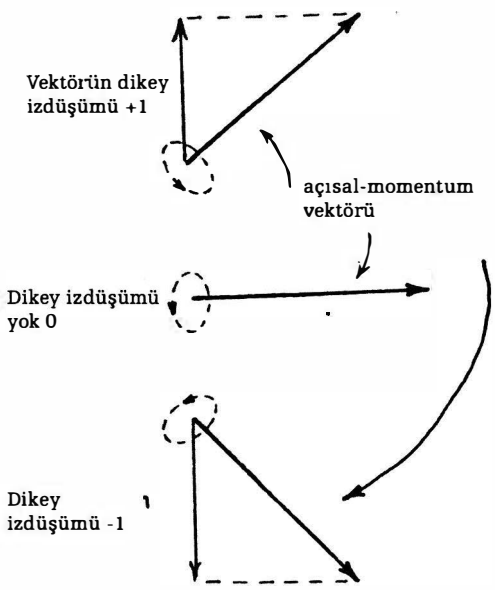
Tüm bu yukarıdakileri söyledikten sonra, şimdi size fizikçilerin gerçekte bir hidrojen atomu bir proton artı bir elektrondan oluşur *dediklerini* ve uyarılmış atom ve taban durumundaki atom aynı varlığın iki durumudur *dediklerini* söylemem gerekiyor. Tüm bunlar bir durumla diğeri veya bir varlıkla diğeri arasındaki yüzdesel değişimle alakalıdır. Bir elektron ve bir proton bir hidrojen atomu oluşturmak için bir araya geldiklerinde olduğu gibi veya bir atom taban durumundan uyarılmış duruma yükseldiğinde olduğu gibi, (diyelim ki kütledeki) bu yüzdesel değişim çok küçükse, atomu bileşik olarak düşünmek, uyarılmış durumu da aynı atomun bir görünümü olarak düşünmek faydalı ve yeterlidir. Ancak bir durumdan diğerine veya bir varlıktan diğerine olan değişim dramatikse, farklı varlıklardan bahseden katı kuantum yorumunu uygulamak daha anlamlı olur.

25. Kuantum sayıları nedir? Birleştirilme kuralları nedir?

Öbekli olan her şey hesaplanabilir. Arabanız saatte sadece on mil, yirmi mil veya otuz mil vb hızla gidebiliyor ve bu hızların arasında bir hızda olamıyor olsaydı, hızlarınızı Hız 1, Hız 2, Hız 3 vb şeklinde hesaplardınız. Eğer –ki öyledir– atomdaki elektronun yörünge açısal momentumu sadece 0, $\hbar$, $2\hbar$, $3\hbar$, $4\hbar$ vb değerlerini alabiliyorsa, o zaman bu değerler 0,1,2,3,4 vb tamsayılarıyla etiketlenebilir. Bunlara bir kuantize özelliği hesapladıkları için *kuantum sayıları* denmektedir. Doğrusunu isterseniz, yörünge açısal momentumun 2, 3 veya hangi tamsayıysa o *olduğunu* söylemek, bu tamsayı çarpı $\hbar$ değerinde olduğunu söylemekten çok daha yaygındır.

Yörünge açısal momentum kuantum sayısı için standart işaret ℓ'dir (el yazısı "ell") ve kuralı sıfır veya pozitif bir tamsayıya eşit olmasıdır.

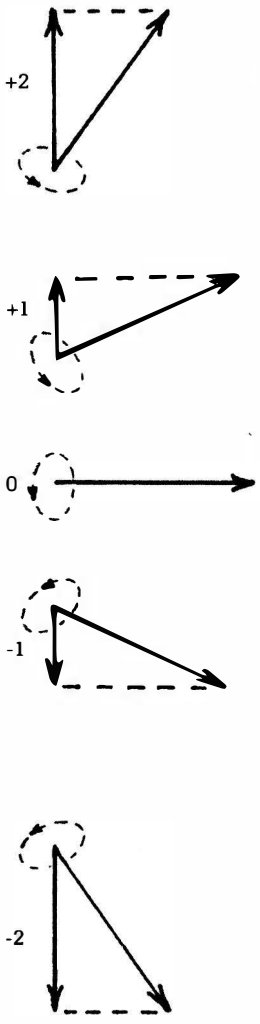
$$\ell = 0,1,2,3, \ldots$$



Şekil 12: Bir birimlik yörünge açısal momentum için üç olası yönlenme sözkonusudur.

Hidrojen atomunun taban durumu için $\ell = 0$'dır. İlk uyarılmış durum için 1, 0 veya 1 olabilir. İkinci uyarılmış durum için 0 veya 1 veya 2 olabilir. ℓ'nin ne büyüklükte olacağına dair bir sınır yoktur; çok büyük olmaya başladığında uyumluluk ilkesi devreye girer, kuantum davranışı klasik davranışa benzemeye başlar. Bunu anlamanıza yardımcı olmak için $\ell = 1$'den $\ell = 2$'ye gitmenin yüzde 100'lük bir değişim anlamına geldiğini, $\ell = 100$'den $\ell = 101$'e gidişin ise yüzde birlik bir değişim olduğunu ve küçük oranlı değişimlerin klasik davranışa yakınlığa sebebiyet verdiğini not edelim.

Açısal momentumun gerçekten dikkat çekici bir özelliğine geçelim. Sadece büyüklüğü değil, aynı zamanda yönlenmesi de kuantize olmuştur. Verili bir yöndeki açısal momentumun bileşeni sadece belirli değerler alabilir ve bu değerlerin biri izleyeninden tam olarak $\hbar$kadar farklılık gösterebilir. Bunun nasıl olduğu Şekil 12'de gösterilmiştir. Bir elektron 1 kuantum bi-



Şekil 13: 2 Birimlik açısal momentum için sözkonusu olan beş yönlenmenin bileşenleri de 1'er birim fark taşırlar.

rimlik ($\hbar$) yörünge açısal momentuma sahipse, bu açısal momentumun bileşeni $\hbar$, 0 veya $-\hbar$ değerinde olur, her değer arasında $\hbar$ kadar fark vardır. Kabaca bu durumda elektronun açısal momentumunun yukarıyı, aşağıyı veya yan tarafı gösterdiği söylenebilir. Şekil 13'te gösterildiği gibi, açısal momentum $2\hbar$ ise beş olası yönlenme olur. Açısal momentum bileşeni öbekli olduğu için, ona da bir kuantum sayısı verilebilir. Buna m_ℓ kuantum sayısı diyoruz. Değerleri birlik basamaklarla ℓ den $-\ell$'ye uzanan bir çeşitlilik gösterir. Dolayısıyla bir birimlik açısal momentum için m_ℓ 0, 1 veya -1 olabilir. 2 birimlik açısal momentum için m_ℓ 2,1,0,-1 veya -2 olabilir.

Peki, fizikçi (veya atom) hangi yönün yukarıda olduğuna nasıl karar vermektedir? Kim –veya ne– bileşenlerin ölçüleceği ekseni seçmektedir? Korkutucu yanıt, "bunun fark etmeyeceği"dir. Açısal momentumun bileşenini hangi eksenden ölçerseniz ölçün, tamsayı bir kuantum değer elde edersiniz. İlk eksene rasgele bir açıyla eğimli başka bir eksenden ölçerseniz de tamsayı kuantum değere sahip olduğunu görürsünüz; aynı değer olması da gerekmez. Kuantum kuramına göre eğer *ölçmezseniz* bileşenin ne olabileceğini söylemenizin bir yolu yoktur; öngörülemez ve bilinmezdir. İşte bu kuantum fiziğindeki en büyük kavrayış esnekliği gerektiren fikirlerden biri olan *üst üste binme* (*süperpo-*

Wolfgang Pauli (*solda*) (1900–1958), burada 1954 yılında Lund, İsveç'te Niels Bohr ve bir "topaç" ile görülüyor. Pauli eleştirilerinde keskin ve sertti, karışık bir çalışma için düştüğü "Doğru değil demek yetmez, yanlış bile değil" notu ünlüdür. Göttingen'den tanıdığım bazı genç teorisyenlerin yeni fikirleri için de tipik biçimde "tamamen saçmalık" yazıp bir hafta sonra yumuşayarak onları kutladığı olmuştu. Bir keresinde Göttingen'deki bir laboratuardaki araç gereç görünür bir neden olmadan çalışmadığında bu "Pauli etkisi"ne atfedilmişti: Sonradan Pauli'nin o sırada Göttingen'den geçen bir trende olduğu ortaya çıktı. Pauli ölümünün arifesinde bir Zürih Hastanesi'nde hasta yatağında yatıyorken ziyaretine gelen asistanına bir söylentiye göre şöyle der: "Oda numarama dikkat ettin mi? 137!"(Soru 94).

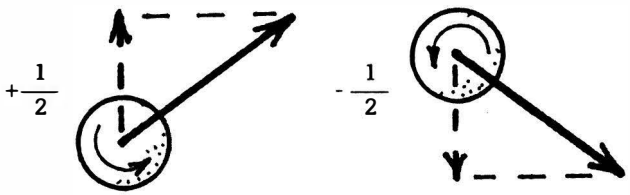
zisyon) fikrinin bir sonucudur, bir sistem aynı anda iki veya daha fazla hareket durumunda olabilir. Açısal momentuma uygularsak bu, dünyanın çevresinde dönen bir uydunun aynı anda Ekvatora göre çeşitli açılarda birkaç farklı yörüngeyi takip edebilmesi gibidir. Soru 76'da üst üste binme fikrini ele alacağız.

Atomdaki elektron için üçüncü bir kuantum sayısı vardır, buna *temel kuantum sayısı* denir ve n ile gösterilir. Buna *temel* denmesinin nedeni belki de tespit edilen - şaşırmayacağınız üzere, yine 1913 yılında Bohr tarafından - ilk kuantum sayısı olmasındandır. Bohr, n=1'i atomun taban durumunu, n=2'yi ilk uyarılmış durumu, n=3'ü ikinci uyarılmış durumu vb ifade edecek şekilde belirledi. Bugün artık n'nin gerçek anlamını kavrayabiliyoruz. Atomdaki elektron dalgasının hem içe-ve-dışa (radyal) hem de çevreleyen (teğet geçen) salınım devirlerinin toplam sayısını ölçüyor. Örneğin, n=20 kuantum sayısı için var olan hareket durumunda elektron dalgası radyal

yönde (çekirdeğin içine ve dışına) yirmi salınım devri gerçekleştirir ve teğetsel (bazen *azimuthal* denir) yönde salınımsız ve düzdür. Bu dalga biraz havuzda çakıl taşının düştüğü yerin etrafında oluşan dalgacıkları andırmaktadır. Başka bir n=20 durumunda ise çekirdek etrafında teğet geçen on dokuz salınım devri vardır, radyal yönde ise sadece bir tane. Bu dalgayı yatay düzlemdeki bir halka içindeki serili bir ip olarak gözünüzde canlandırabilirsiniz. Bu iki hareket durumu arasında içeri-dışarı ve çevresel dalga salınımlarının on sekiz farklı kombinasyonu yer alır. Toplamda n=20 olan yirmi farklı hareket durumu vardır (her birinde açısal momentum kuantum sayısı ℓ farklıdır).

Anlattıklarımızın gösterdiği üzere en düşük enerji durumu veya taban durumu (n=1), dalgası için sadece bir salınım devrine sahiptir (aslında atomun bir "ucu"ndaki küçük bir değerden atomun merkezindeki maksimum değere doğru artış ve sonra atomun zıt "ucu"na doğru yeniden azalma). Buna özelliksiz dalga "damlacığı" diyebiliriz. Burada şuna da dikkat çekelim, çekirdeğin içerisindeki proton ve nötronlar biraz serbestçe hareket edebildikleri ölçüde, onlar da atomlardaki elektronlarla aynı kuantum sayılarıyla tanımlanırlar.

1925'te, Bohr'un çığır açıcı çalışmasından bir düzine yıl sonra fizikçiler (her ne kadar henüz elektron durumunun dalga resmine ulaşmamış olsalar da) bahsettiğimiz üç kuantum sayısı n, ℓ ve m_ℓ'yi benimsemişler ve atomdaki elektronun her ayrı hareket durumunun bu üç sayının özgül kombinasyonu ile karakterize olduğunu anlamışlardı. Aynı yıl yirmi beş yaşındaki Avusturyalı fizikçi Wolfgang Pauli (o dönem Almanya'da çalışmaktadır) kuantum durumları ve kuantum sayıları kavrayışı adına iki yeni fikir üreterek farklı bir bakış önerdi. İlk olarak sonradan *dışarlama ilkesi* olarak adlandırılacak önermeyi geliştirdi: Verili bir hareket durumunu hiçbir zaman bir elektrondan fazlası işgal edemez; veya aynı anlama gelecek şekilde, aynı kuantum sayısı setine aynı anda iki elektron birden sahip olamaz. İkinci olarak Pauli, bu ilkenin atomik spektrum hakkında bildiklerimizle uyumlu hale getirilmesi için dördüncü bir kuantum sayısına ihtiyaç olduğunu söyledi. Bu yeni sayı



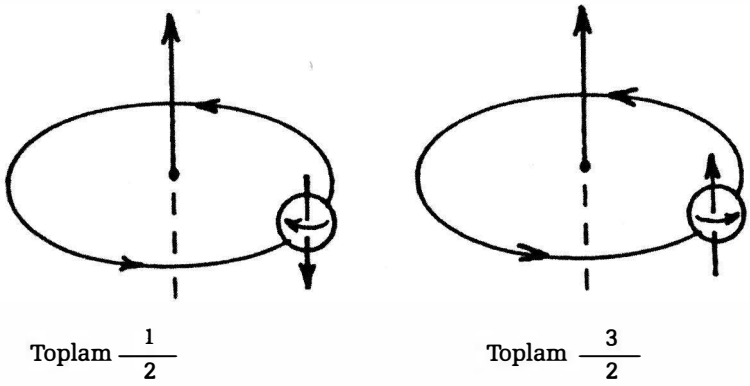
Şekil 14: Elektron spininin iki olası yönlenmesi, birbirlerinden 1 birim farklı bileşenlere sahiptir.

diye ekledi, açma-kapama düğmesi cinsindenmişçesine sadece iki değer alabilme gibi garip bir özelliğe sahiptir.

Hemen ardından, Soru 21'de tanıştığımız iki Hollandalı fizikçi Samuel Goudsmith ve George Uhlenbeck, bu dördüncü kuantum sayısının neyi temsil ettiğine dair cüretkâr bir bakış önerdiler: Spin –veya daha net bir ifadeyle spinin yönlenmesi. Elektronun 1/2 birimlik spini olması gerektiğini söylediler. Açısal momentumun birbirini izleyen bileşenlerinin arasında 1'er birim fark olması gerektiğini söyleyen kuantum kuralıyla uyumlu olarak + 1/2 ve – 1/2 olmak üzere (aralarındaki fark 1'dir) elektron spininin iki olası yönlenmesi vardır. Elektronun olası iki spin yönü Şekil 14'de gösterilmektedir. Spinin kendisi kuantize bir niceliktir, dolayısıyla da adını *s* koyabileceğimiz bir kuantum sayısı alabilir. Ancak bu - kütle ve elektrik yükü gibi - elektronun sadece tek bir değeri olan sabit bir özelliğidir, o yüzden onun izini sürmemize gerek yok. Kuantum yönlenme sayısı (m_s) ise iki ayrı değer alabilir. Bu Pauli'nin dördüncü kuantum sayısıdır.

Toparlayalım, atomdaki elektron, hangi özel hareket durumunda olursa olsun, dört kuantum sayısı ile etiketlenmektedir: n, ℓ, m_ℓ ve m_s. Proton ve nötronlar da 1/2 birim spine sahip oldukları için, onlar da çekirdeğin içinde hareket ederlerken aynı kuantum sayı seti ile karakterize olurlar.

Soru 21'de açısal momentumları birleştirme kurallarını anlatmıştık. Şekil 15 bu kurallardan bir tanesinin, yörünge açısal momentumu 1 ve spin açısal momentumu 1/2 olan bir elektron için nasıl uygulanabileceğini gösteriyor. Elektronun toplam



Şekil 15: 1 birim yörünge açısal momentumu olan bir elektron, ya 1/2 ya da 3/2 birim toplam açısal momentuma sahip olabilir.

açısal momentumu 1/2 (iki olası yönlenme ile) veya 3/2 (dört olası yönlenme ile) olabilir.

26. Kuantum sıçrama nedir?

1913'te Niels Bohr kuantum fiziğinde çok önemli ve bizlerin bugün de savunduğumuz fikirlerden birçoğunu geliştirdi. Yine de bu fikirler halen bizler için şaşırtıcılıklarını korumaya devam ediyorlar. Bunlardan birisi de kuantum sıçramadır: bir hareket durumundan (veya Bohr'un deyişiyle sabit durumdan) diğerine birdenbire gerçekleşen geçiş. Sağduyudan bu kadar ayrışabilen başka ne olabilirdi? "Bundan daha saçma ne olabilirdi?" diyen de olabilir. Bu neye benzer biliyor musunuz? Manhattan'ın Upper East Side'ında bir blokta sabırla park yeri arayarak dolaşıp duruyorsunuz, sonra birden kendinizi hiç araç sürmeden Greenwich Village'daki Washington Square'da buluyorsunuz. Bohr'un yol göstericisi olan Ernest Rutherford bu fikirle ilk kez Bohr'un bir yazı taslağında karşılaştı, anlaşılır biçimde de canı sıkıldı. "Bana öyle geliyor ki" diye yazdı Bohr'a[17], "elektronun

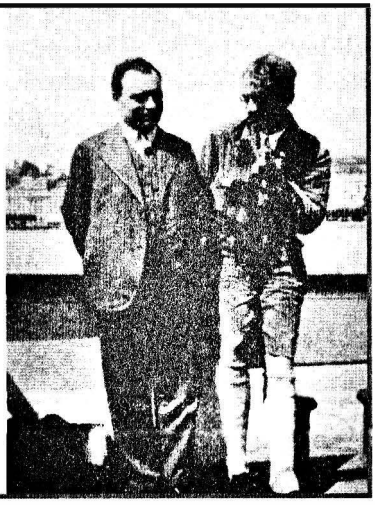
17 O dönemde Bohr Danimarka'da, Rutherford'da İngiltere'deydi. İletişimleri mektup yoluylaydı ve eğer mektupların okyanusu aşması gerekmiyorsa bu yöntem bugüne oranla o zamanlarda genelde daha süratliydi diyebiliriz.

önceden nerede duracağını bildiğini varsayman gerekecek". Rutherford "ve ne zaman sıçrayacağını da" diye ekleyebilirdi. Ne zaman ve nereye sorularının yanıtları önceden bilinemez. Kuantum sıçrama, Bohr'un fikri ortaya attığı zamandan başlayarak yaklaşık yüz yıl boyunca fizikçileri derin derin düşündürmeye devam etti. Albert Einstein tekrar tekrar bu fikri beğenmediğini söyledi, başka fizikçiler de aslında "Doğrusu biz de beğenmiyoruz, ancak bu kuantum dünyasının bir gerçeği" dediler.

Kuantum sıçramayı diğer geçişlerden ayıran şey kendiliğinden olmasıdır. Hiçbir şey ona sebep olmuyor. Hiçbir şey tetiklemiyor. Sadece oluyor.[18] Öngörülemez anlığına karşın kuantum sıçrama tüm kurallara uymaktadır. Enerji, yük, açısal momentum gibi çeşitli nicelikler korunmaktadır – bir diğer deyişle sıçramadan sonra da öncesiyle aynıdır. Örneğin atomun içindeki bir elektron yüksek enerjiliden düşük enerjili bir hareket durumuna sıçradığında aradaki enerji farkını kendisinde taşıyan bir foton salar. (Bohr o tarihte henüz Einstein'ın foton fikrini benimsememişti, ancak atomun enerji kaybının radyasyona eklenen enerjiyle denkleştiği düşüncesini paylaşıyordu.)

Bugünse kuantum sıçramaların ilk sunulduğu bağlamın ötesinde başka durumlarda da gerçekleştiğini biliyoruz. Daha yüksek bir enerji durumundan daha düşük bir enerji durumuna her geçiş kuantum sıçramadır, foton salınsın ya da salınmasın. Örneğin bir radyoaktif çekirdek birdenbire bir alfa parçacığı çıkartabilir, böylelikle kendisini iki eksik proton ve iki eksik nötronu olan başka bir çekirdeğe dönüştürebilir. İlk ve son durumlar arasındaki enerji farkı, salınan alfa parçacığına gider (ve daha az olmak üzere bir bölümü de geri tepen çekirdeğin kinetik enerjisine). Kararsız parçacıkların bozunumları da kuantum sıçramalardır, olayın ne zaman olacağının aynı öngörülemezliği – ve bazen de bozunumun ürünlerinin ne olacağının öngörülemezliği ile. Örneğin bir pion ortadan kalktığında, bir müon ve bir nötrino pionun olduğu yerden uçarak uzaklaşırlar, bu da bir kuantum sıçramadır.

18 "Uyarılmış yayınım" bu kuralın istisnasıdır. *Bkz.* Soru 80.



George Gamow (*sağda*) (1904–1968) burada Wolfgang Pauli'yle beraber 1930 yılında İsviçre'de bir gölde vapur yolculuğunda görüntülenmiş. O dönemde her ikisi de 20'li yaşlarındaydılar ve çoktan fiziğe önemli katkılar gerçekleştirmişlerdi. Karakterleri de giyim zevkleri kadar farklıydı.

1928'de o dönem Kopenhag'da çalışan Rus fizikçi George Gamow[19], Ronald Gurney ve Edward Condon[20] (sırasıyla İngiliz ve Amerikalı) radyoaktif alfa bozunumu kuramını ortaya attılar ve yeni tipte bir kuantum sıçrama tarif ettiler: Engeli delip geçme veya tünelle geçme. Klasik fiziğe göre geçilemez bir engel, eğer bunu başarmak enerji açığa çıkarıyorsa kendiliğinden bir kuantum sıçramayla aşılabilir. Alfa bozunumu böylesi bir engel aşmayı gerektirir ve bu taramalı tünelleme mikroskobu ve tünel diyot gibi modern cihazlarda da görülebilir.

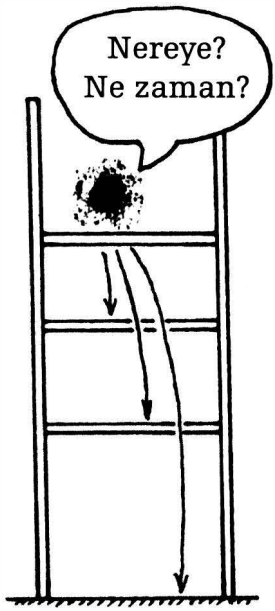
19 Gamow'la 1950'de Los Alamos'ta tanıştım. O dönemde fizikçi olarak dehasının yanı sıra muzip mizah anlayışı ve sert içki tüketimiyle de tanınırdı. Gruba hem dikkat çekici fikirler, hem de gülüşmeler katıyordu.

20 Condon daha sonra Washington'daki Ulusal Standartlar Bürosu'nun müdürü oldu, ancak Senatör Joseph McCarthy yüzünden memuriyeti bırakmak zorunda kalarak önce bir endüstriyel araştırma laboratuarında çalıştı, sonrasında da üniversite profesörlüğü yaptı. Bir keresinde "Benim problemim" dediğini duydum, "başka kimlerin üye olabileceğini sormaksızın, amacını onayladığım her örgütlenmeye katılmaktı".

27. Kuantum fiziğinde olasılığın rolü nedir?

"Başrollerden biri" diyebiliriz. Kuantum fiziğinde gündelik yaşam algımızla çelişen şeylerin çoğunun olasılık ile bir alakası vardır. Bir hidrojen atomundaki uyarılmış durumdaki elektronu düşünün. Şekil 16'da bir fikir vermeye çalıştığımız üzere elektronun "karar vermesi" gereken iki şey vardır: birincisi ne zaman sıçranacak; ikincisi tek bir düşük-enerji durumundan daha fazlası kullanılabiliyorsa eğer, nereye sıçranacak. Her iki "karar" da olasılık tarafından yönetilir, belirlenir. Bir kuantum fizikçisi, elektronun her bir düşük enerji durumuna sıçrama olasılığını ve ayrıca elektronun sıçramadan önce uyarılmış durumda bulunmasının ortalama süresini hesaplayabilir. (Radyoaktif çekirdek gibi daha karmaşık sistemlerde olasılıkların nasıl hesaplanacağını bilmiyoruz, ama var olduklarını ve ne olacağını belirlediklerini biliyoruz.)

Kuantum sıçramasının koşulları – zamanı ve gidiş yeri – kesin değilse de, kesin olan bir şey vardır: Verili bir uyarılmış durumdaki aynı cinsten her bir atom, o durumdaki diğer atomlarla aynı olasılıkla belirlenir. Her biri belirli bir uyarılmış durumda bulunan bir milyon atomunuz varsa, bunlar düşük enerji durumlarına bir milyon farklı kere kuantum sıçraması yaparlar. Her biri de aynı amansız olasılık tarafından yönetilir. Bu bir milyon yaşam ömrünü ölçer ve ortalamasını alırsanız, sözkonusu durum için "ortalama yaşam ömrü"ne ulaşırsınız. Deneyi bir milyon başka atomla ve yine onların ortalama yaşam ömürleriyle yenilerseniz, (çok yaklaşık olarak) aynı ortalama yaşam ömrünü bulursunuz. Ortalama yaşam ömrü sözkonusu



Resim 16: Bir kuantum sıçramasının nereye ve ne zaman olacağını olasılıklar belirler.

durumun yerleşik karakteristiğidir. Belki de hiçbir tekil atom ortalama yaşam ömrü ile tam olarak aynı süre yaşamayacaktır, ancak belirli bir durumdan kuantum sıçramasını yeteri kadar sayıda ölçerseniz, güvenilir şekilde aynı ortalama yaşam ömrüne ulaşacaksınız.[21]

Başka bir örnek verelim. Nötron veya protondan biraz daha kütleli olan *lambda* denen bir parçacığı ele alalım. Ortalama yaşam ömrü $2{,}6 \times 10^{-10}$ (bir nano saniyeden biraz daha az) olan yüksüz bir baryondur[22] ve temelde iki yolla bozunuma uğrar, ya bir proton ve bir negatif piona veya bir nötron ve bir yüksüz piona dönüşür:

$$\Lambda \rightarrow p + \pi^- \text{ yüzde 64 olasılıkla}$$

veya

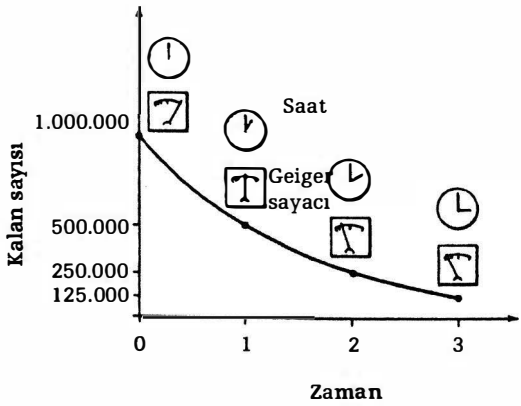
$$\Lambda \rightarrow n + \pi^0 \text{ yüzde 36 olasılıkla}$$

Bunlar lambda parçacığının temel iki kuantum sıçrama biçimidir (çok daha düşük düzeyde olası olan başka olasılıklar da vardır). İlk ve son parçacıklar çok farklı olsalar da, Bohr'un hidrojen atomunun içerisinde olduğunu tahayyül ettiği sıçrama ne kadar gerçekse, burada da aynı ölçüde gerçek bir kuantum sıçraması sözkonusudur. Kesin bir tanımlamayla şunu belirtebiliriz: Kuantum sıçraması kütlenin azaldığı kendiliğinden bir hal değişikliğidir (evet bir foton dışarı verildiğinde atomda kütle -hafif miktarda- düşer). Atomda olduğu gibi, olasılık sadece ortalama yaşam ömrünü değil aynı zamanda son durumun seçimini de belirlemede bir rol oynamaktadır. Yukarıda belirttiğimiz göreli yüzdelerin oranına (64/36) *dallanma oranı* denir.

---

21 Ortalama yaşam ömrü ve bozunum olasılığı birbirlerinin ters katıdır. Örneğin belirli bir çekirdeğin radyoaktif bozunmaya uğrama olasılığı saatte 0,25 ise, bu çekirdek için ortalama yaşam ömrü dört saattir. (Bu çekirdeklerin tümünün dört saat sonra bozunuma uğramış olacağı anlamına *gelmez*. Bir saatin sonunda, saatin başında var olanların yaklaşık ¼'ünün bozunuma uğrayacağı ve ¾ 'ünün bozunuma uğramayacağı anlamına gelir. Dört saat sonra çekirdeklerin orijinal miktarının yaklaşık 1/3'ü yine orada olacaktır.)

22 Baryonun tanımı için *bkz.* Soru 44.



Resim 17: Üstel fonksiyon hem kalan radyoaktif çekirdek sayısını hem de bozunum hızlarını gösterir.

Kendiliğinden bozunuma eşlik eden kütle azalmasına *tepe aşağı kuralı* denilebilir. Bir kayanın tepe yukarı değil tepeden aşağı yuvarlanması gibi, kuantum sıçramalar da tepeden aşağıya kütle kaybederek ilerler. Ancak toplam enerji her zaman korunur. Tepeden aşağı yuvarlanan kaya için potansiyel enerji kaybı, hareket enerjisi ve ısı enerjisi kazanımıyla eşlenir. Bozunuma uğrayan lambda parçacığı için de kütle kaybı yeni parçacık bölüntülerinin hareket enerjisi ile eşlenir.

Bozunum süreçlerinde olasılık kendisini sadece öngörülemezlikte ve tekil olayların görünüşteki rasgeleliğinde değil, kararsız parçacıkların birçoğunun genel hareketinde gösterir. Zaman içerisinde bozunuma uğramamış parçacıkların sayısı, *üstel fonksiyon* adını verdiğimiz bir matematik kuralına uymaktadır. Şekil 17'de bu tip bir fonksiyon gösterilmektedir. Bir milyon radyoaktif çekirdekle başlamışsanız, *yarı-ömür* denen bir süre sonrasında geriye yaklaşık 500.000 tanesi kalmıştır. *Ortalama ömür* dediğimiz biraz daha uzun bir süre sonrasında ise yaklaşık yüzde 37'si bozunmadan kalır.[23] İlginç biçimde

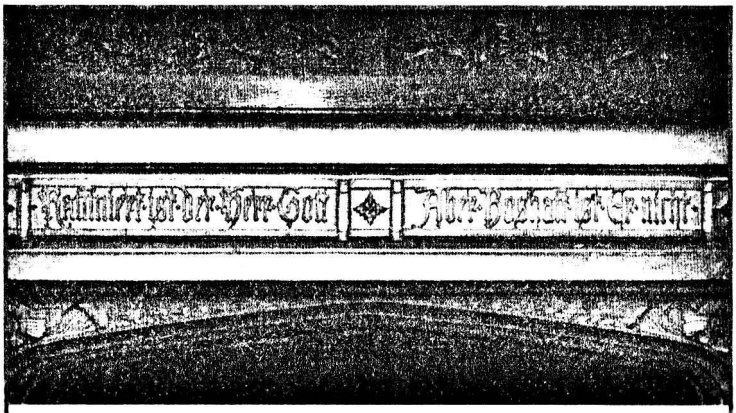
23 Yarı-ömür ile ortalama ömrün oranı tam olarak 0,693'tür; bu kuantum sıçramaları gibi bozunum olasılığının zamanla bağlantılı olarak değişmediği olaylarda da geçerlidir. İnsanlarda da yaşam sürelerine olasılık hükmetmesine karşın bizde durum oldukça farklı-

bozunum olaylarının gerçekleşme *oranı*nın da aynı üstel dağılım yasasını takip ettiği ortaya çıkmıştır.

Radyoaktivite araştırmalarının öncüsü Ernest Rutherford, 1899 yılında üzerinde çalıştığı radyoaktif atomların bir bölümünün üstel dağılımlı bir bozunum yasasını takip ettiğini gözlemlediğinde, doğru biçimde burada olasılık yasasının işlemesi gerektiği sonucuna vardı. Gözlemlediğinin kökten bir olasılık olduğunu ise kestirebilmiş değildi. Olasılığa sonuç itibariyle günlük yaşamımızda yabancı olmadığımız gibi, bu bilimsel alanda da iyi bilinen bir konuydu. Bu "klasik" olasılığa *habersizlik olasılığı* diyebiliriz. Bir sonucu kesin olarak öngörebilmek için elimizde yeterli bilgi yoksa karşımıza çıkar. Futbol maçının başında atılan yazı-turanın sonucunun ne olacağını öngöremeyiz, çünkü birçok faktörden habersizizdir: Para hangi kuvvet ve torka maruz kalmış, hangi yükseklikten atılmış, düşerken hangi hava akımlarından etkilenmiş olabilir? Bu bilgilere sahip olmadığımız için tüm söyleyebildiğimiz paranın yazı veya tura gelmesinin yüzde elli-elli olasılığa sahip olduğudur.

Rutherford, hepimizin anlaşılır bulacağı şekilde, her atomun içerisinde karmaşık olayların sahne aldığını, bu olaylardan kendisinin habersiz olduğunu ve radyoaktif bozunumda gözlemlenen olasılığa bu faktörlerin yol açtığını varsaydı. Bohr'un sabit durumları ve kuantum sıçramaları kabul edildikten sonra dahi, kuantum fiziği epey ilerledikten sonra bile fizikçiler gözlemledikleri olasılığın bir habersizlik olasılığı olduğu fikrinden vazgeçmekte isteksiz davrandılar. 1926 yılında Alman fizikçi Max Born'un kuantum fiziğinde *kökten bir olasılığın* işlediğini öne sürmesi tam bir cesaret gösterisiydi. Born'un önerdiği ve bizim bugün kabul ettiğimiz gerçek şu: Bizlerin bir kuantum sistemi hakkındaki bilgimizin düzeyi ne olursa olsun, sistemin davranışı her koşulda yine olasılık kurallarına bağlıdır. Belirli bir sistem hakkında bilinebilecek her şeyi bilmenize karşın ne yapacağını öngörememek ve iki

dır. Hayatta kalanların sayısı üstel bir dağılım eğrisine uymaz. 2004 yılında Amerikalılar için yarı ömür yaklaşık 81 yıldı ve 77 yıl olan ortalama ömürden daha uzundu.



"Tanrı inceliklidir, kötü niyetli değil" ("Raffiniert ist der Herr Gott / Aber Boshaft ist Er nicht"). Einstein'ın bu sözünün Princeton Üniversitesindeki Jones Hall'daki (eski Fine Hall) bir şöminenin üzerine yazılmış hali görülüyor.

sistemin her şeyiyle aynı olsalar dahi farklı davranabileceklerini kabul etmek zorunda kalmak göz korkutucu bir fikirdir. Durum briç turnuvalarında birbiriyle aynı desteler kullanılmasına karşın her masada dağıtılan ellerin farklı olmasına benzemektedir.

Olasılığın kuantum fiziğine içkin olması Einstein'ı yaşamı boyunca tedirgin etmiştir. Tanrının zar attığına inanamayacağını ve ancak kötücül bir Tanrının doğaya kökten bir olasılık katacağını söylemeyi severdi.[24]

28. Kuantum dünyasında hiç belirlilik var mı?

Kısa yanıt: Evet, hem de çok. Bahsettiğimiz kuantum sayılarının tümü kesindir. Kütle, yük, spin, enerji, lepton sayısı, baryon sayısı; tümü her bir parçacık ve hareket durumu için sabit değerlerle belirlenebilir. Ve paradoksal olarak olasılık bile belirlidir. Örneğin Flor–18 atomunun radyoaktif çekirdeğinin orta-

24 Einstein sıkça Tanrıya ya da İhtiyara ("The Old One") konuşmalarında sıkça başvursa da, kişisel bir Tanrıya inanmadığını birden fazla kez belirtmiştir.

lama ömrü yaklaşık 9500 saniyedir.[25] Herhangi bir verili saniyede bozunma olasılığı 9500'te 1'dir. Bu, bu çekirdeğin her bir örneği için doğrudur, bu çekirdek daha önce ne kadar süreyle var olmuş olursa olsun yine doğrudur. Kısacası saniye başına 9500'te 1 olasılık, bu çekirdeğin sabit ve belirli bir özelliğidir. Bazı kuantum olasılıkları hesaplanabilir. Çoğunluğu ise sadece ölçüm yoluyla bilinebilir.

Büyük ölçekli dünyada güvenilir kesinlikte olasılıklar rahatlıkla bilinebilir. Dengeli bir paranın tura gelme şansı tam olarak yüzde 50'dir. Bir çift zarın hepyek (iki tane bir) gelme olasılığı tam olarak otuz altıda birdir. Benzer şekilde kuantum dünyasında belirsizlikte belirlilik vardır.

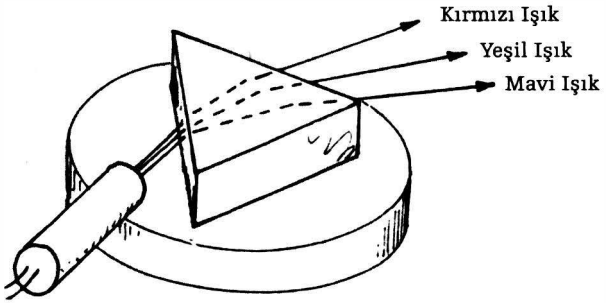
25 Oksijen-18'e bozunurken bir pozitron veya karşı-elektron salan Flor–18, pozitron emisyonu (yayınımı) tomografisinde (PET taraması) yaygın biçimde kullanılır.

V. Bölüm

Atomlar ve Çekirdekler

29. Çizgi spektrumu nedir? Bize atomlar hakkında ne öğretmektedir?

Fotonlardan da önce ışık vardı. Diyeceğimiz o ki, bilim insanları ışığa dair onun kuantum doğasını keşfetmeden önce de epey şey bilmekteydiler. On yedinci yüzyılda Isaac Newton, beyaz ışığı renk bileşenlerine ayırmak için bir prizma kullandı ve bulduğu renk yelpazesine *spektrum* (tayf) adını verdi. Onu izleyen yüzyılda bilim insanları prizmaları sadece güneş ışığı ve mum ışığı üzerinde çalışmak için değil, aynı zamanda özel maddeler tarafından yayınlanan ışığı incelemek için de kullandılar ve farklı renklerin göreli yoğunluğunun maddeye bağlı olarak değiştiğini tespit ettiler. Bunu Thomas Young'ın 1801'de ışığın dalga karakteri taşımasına açık bir kanıt olarak ışık girişimini ortaya koyması ile başlayan, on dokuzuncu yüzyıldaki büyük keşif seli takip etti.



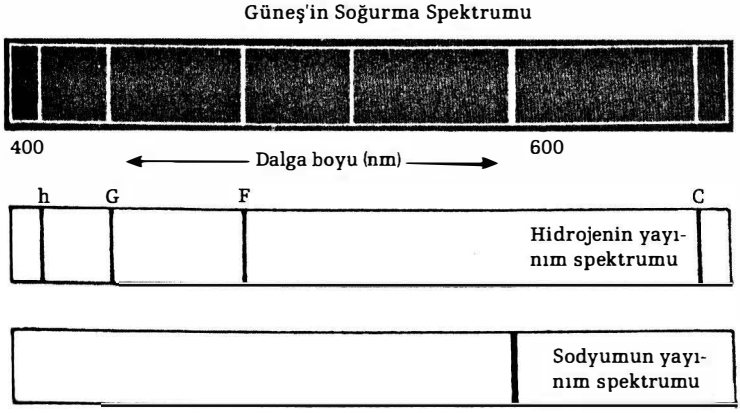
Şekil 18: Bu spektroskopta bir prizma, farklı dalga boylarındaki ışığın farklı yönlere yollanmasını sağlıyor.

Işığı bir renk spektrumuna dönüştüren aletlere *spektroskop* adı verilir (Şekil 18). 1800'lerin ortalarında spektroskop artık bir hassasiyet aygıtı haline gelmişti. Alete dar bir aralıktan girmesine izin verilen ışık bir prizmaya ya da bir kırınım ağına çarpıyor, bunun etkisi ise farklı dalga boylarındaki ışığın farklı yönlere sapması oluyordu.[26] Dalga boylarını ölçmek ancak bundan sonra mümkün oluyordu. On dokuzuncu yüzyılın sonunda dalga boyları, fizikte en kesin biçimde ölçülebilen nicelikler durumundaydılar. Dalga boyu ve dalga hızı (on dokuzuncu yüzyılda ışığın hızı artan bir kesinlikle ölçülebiliyordu) verilmiş ise, bir fizikçi gibi bir fizik öğrencisi de dalganın titreşim frekansını ölçebilirdi. Planck'ın 1900 yılındaki çalışması esnasında, ölçümler kızılaltı ve morötesi alanlara doğru genişlemişti bile.[27]

---

26 Genellikle camdan yapılan prizma, farklı dalga boylarındaki ışığın farklı miktarlarda yavaşlamasını sağlıyordu. Cam veya metali kaplayan bir dizi çok ince paralel çizgiden oluşan ağ, ışığın her bir dalga boyu için farklı bir girişim çizgisi üretmeye yarıyordu. Her iki durumda da oluşan ışığın yönü, dalga boyuna bağlıdır.

27 Görünür ışık için dalga boyu aralığı, yaklaşık 400 nm ila 700 nm arası (müzik terminolojisiyle bir oktavdan biraz daha az); görünür ışık için frekans aralığı ise yaklaşık 4,5 ila 7,5 x 10^{14} hertz arasıdır (450–750 terahertz; 1 hertz saniye başına bir döngüdür). Kızılaltı ışınım (infrared radiation), görünür ışığa göre daha düşük bir frekansa ve daha uzun dalga boyuna; morötesi (ultraviolet) ise görünür ışığa göre daha yüksek bir frekansa ve daha kısa dalga boyuna sahiptir.



Şekil 19: Dünya'daki kaynaklar tarafından yayılan spektral çizgiler, Güneş ışığındaki soğurma çizgileri ile eşleşmektedir.

Elektrik ampulündeki ışık bir "sürekli spektrum"dur. Bu, spektrum boyunca pürüzsüz yayınlanan sürekli bir frekans silsilesinden oluştuğu anlamına gelir. Güneş ışığı *neredeyse* sürekli bir spektrumdur, ancak tam olarak değildir. Bir "çizgi spektrumu" da gösterir. 1814'de Alman optikçi Joseph von Fraunhofer, bugün *Fraunhofer çizgileri* dediğimiz bir dizi karanlık çizginin güneş spektrumundaki varlığını keşfetti. Spektrumdaki "çizgi", spektroskopun belli bir frekanstaki (ya da dalga boyundaki) dar giriş aralığının görüntüsüdür. Fraunhofer tarafından gözlemlenen bu karanlık çizgiler, bu frekansta ışığın yokluğunu ya da neredeyse yokluğunu göstermekteydiler. Bilimciler daha sonra laboratuar tayflarında dünyaya düşen gelişmiş radyasyon özelliği gösteren belli frekanslardaki parlak çizgiler ya da "yayınım çizgileri"ni keşfettiler.

Bazı yayınım çizgilerinin Fraunhofer'in karanlık çizgileri ile tam olarak eşleştiği açığa çıkmıştır. Bu ve başka bazı kanıtlar, bizi bir malzemenin ışığı aynı frekanslarda yayması ve soğurmasının mümkün olduğu sonucuna ulaştırmıştır. Dahası her elementin kendisine özgü bir spektral çizgi "imzası" olduğu

ortaya çıkmıştır.[28] Bu gerçek, on dokuzuncu yüzyılın ortalarından itibaren spektral analizi bir kimyasal analiz yolu haline getirmiştir. Bugün gökbilimcilerin uzak galaksiler ve gaz bulutlarındaki elementleri saptamalarını mümkün kılan da budur. Dünyada bulunan elementlerin evrende de var olduğuna dönük ilk kanıtlardan bazılarını Fraunhofer çizgilerine borçluyuz. Bu çizgiler, güneş ışığının seçili frekanslarda Güneş'in yüzeyi üzerinde uçuşan daha soğuk atomlarca soğurulması sonucunda oluşmaktadır. Elementlerden biri, ilginç bir biçimde dünya üzerinde keşfedilmesinden önce güneş ışığının içindeki spektral çizgilerinden birinde bulunmuştur. 1868 yılında bir tutulma sırasında güneş ışığını gözlemlerken Britanyalı gökbilimci Norman Lockyer ve Fransız bilimci Pierre Janssen birbirlerinden ayrı olarak yeni bir spektral çizgi tespit ederler, Lockyer doğru biçimde bunu yeni bir elementin varlığına bağlar. Bu yeni elementi de Güneş'ten yola çıkarak *helyum* diye adlandırır.[29] Şekil 19 güneş spektrumundaki başlıca çizgileri ve kimi yayınım tayflarını göstermektedir.

Bilimdeki büyük ilerlemelerin birçoğu, ayrı olduğuna inanılan şeylerin birleştirilmesinden doğmuştur. Newton dünyadaki hareketi gökteki hareketle birleştirdi. Einstein zaman ve mekânı, dolayısıyla kütle ve enerjiyi birleştirdi. On dokuzuncu yüzyılın başında Danimarka'da bir derslikte Hans Christian Oersted elektrik ile manyetizma arasındaki bağlantıyı açığa çıkardı. Aynı yüzyılda Britanyalı fizikçi James Clerk Maxwell ışık ve elektromanyetizmayı birleştirerek başka bir bağlantı daha buldu. Maxwell elektrik yükünün salındığı veya hızlandı-

28 Verili bir elementin soğurma ve yayınım spektrumu özdeş olamaz. Soğurma, esasen atomun taban durumuna göre bir enerji "yükselmesi" iken; yayınım ise sadece taban durumuna değil, başka düşük-enerji durumlarına da geçişi sağlayan bir enerji "alçalması" anlamına gelmektedir.

29 Helyumun varlığı 1895 yılına dek yeryüzünde tespit edilemedi. Yer yüzeyinde var olan helyum ilginç bir biçimde büyük oranda radyoaktif alfa bozunumunun sonucudur. Bir alfa parçacığı yavaşladığında iki elektron alır ve böylelikle helyum atomu oluşur. Helyum küçük miktarlarda kristalin materyaller içerisinde gömülü olarak ve büyük miktarlarda da doğal gazın bileşeni olarak bulunmaktadır.

ğı durumlarda elektromanyetik ışınımın yayınlanacağını savladı. Belli frekanslarda – 10^{14} hertz'in birkaç katı – bu ışınım, görünür ışık formundadır. Daha düşük frekanslarda ise radyo dalgaları biçimini alır (ilk kez 1886'da Heinrich Hertz tarafından ortaya çıkarıldılar, bugün kablosuz dünyamızda uzayı dolduruyorlar). Daha büyük frekanslarda X-ışınları ve gama ışınları biçimindedir. Spektrum boyunca mekanizma aynıdır. Salınımlı elektrik yükü, elektromanyetik ışınım üretmek için enerjisini feda edebilir. Ters yönden de bu ışınım, yükün salınım göstermesi için enerjisinden vazgeçebilir.

Dolayısıyla Maxwell'e göre ışık da sonuçta bir elektriksel olgudur. Elektrik yükü bir antende sözgelimi saniyede bir milyon döngü ile salınıyorsa, 1 megahertz frekansında radyo dalgaları yayınlanır (AM bandının ortasında). Yük bir atomun içerisinde sözgelimi 6×10^{14} hertz'lik bir salınım gösteriyorsa yeşil ışık yayınlanır (görünür ışık bandının ortasında). Atom ışınımının (radyasyon) klasik açıklaması da yine bu temeldedir.

On dokuzuncu yüzyılın sonuna gelindiğinde fizikçilerin – en azından içlerinden atomlara inananlarının – çizgi tayfları konusunda kafalarının karışması için bir sebep görünmüyordu. Salınımın doğal frekansları mekanik dünyada, yanı sıra radyo yayını olgusu yoluyla elektrik dünyasında da gayet iyi bilinmekteydi. Bu yüzden Thomson'un elektronu keşfinin ardından elektronları atomun bileşeni olarak kafada canlandırabilmek pek de zor olmadı. Bilimciler, bir element ışığı belirli bir frekansta yaydığında, bunun nedeninin elementlerin atomlarındaki elektronların tam bu kendisine özgü frekanslarda salınım göstermesi olduğunu, aynısının içerisinde elektronların belli karakteristik frekanslarda salınım gösterdiği bir anten tarafından yayınlanan radyo dalgalarında da geçerli olduğunu mantıken öngörebiliyorlardı. Soğurma da yayınımın tersi biçiminde işlemekteydi. Radyo dalgaları antendeki elektronları salınıma sokuyorlardı. Elektronların sadece belirli "doğal" frekanslarda salınım göstermesi beklendiği için ışığın soğurma ve yayınımı da belli frekanslarda gerçekleşecektir, bu da çizgi tayflarını açıklar.

Bugün buna nasıl bakıyoruz? Belli yönlerden öyle büyük farklar sözkonusu değil, çünkü halen ışığın atomlardaki elektronlar tarafından yayınlandığını ve soğurulduğunu ve enerjinin de elektronlarla ışık arasında değiş tokuş edildiğini söylüyoruz. Öte yandan meseleyi görme açımızın çok önemli yönlerden dramatik bir biçimde değişikliğe uğradığını söylemeliyiz. Çizgi tayflarının klasik ve kuantum açıklamaları arasında çok önemli iki fark sözkonusu: Bohr'un hidrojen atomu kuramında attığı cesur adım, elektrik yükünün titreşim frekansının ışınım frekansıyla örtüştüğü yönündeki – Maxwell'in kuramında koyulan ve radyo dalgalarını açıklayan – yerleşmiş klasik fikirden kendisini özgürleştirmek oldu. Bohr, elektron ilk durumunda bir frekansta ve son durumunda farklı bir frekansta titreştiği için, ışınımlanmış (*radiated*) frekansın elektron frekansıyla eşleşemeyeceği sonucuna vardı. Bunun yerine ışınımlanmış frekans, Planck'ın $E=hf$ formülünde işaret edildiği gibi, enerji değişimi tarafından belirlenir. Formülü biraz düzenleyerek

$$f = \Delta E/h$$

Formülünü elde ederiz; ışınımlanmış frekans f, enerji değişimi ΔE bölü Planck sabiti h'ye eşittir. Elektron titreşim frekansı bu denkleme dâhil değildir.

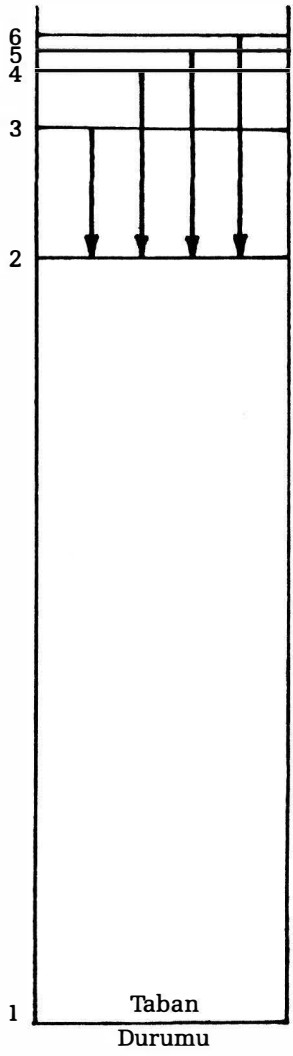
Diğer büyük değişiklik ise tedrici, istikrarlı yayınımın yerini ani yayınımın, kuantum sıçramasının sonucu olarak, ışınımlanmış enerjinin kuantum sıçramasının –foton– almasıdır. (Bohr bu sonuca *çok* yaklaşmıştı. Kuantum sıçraması ve ışınımın aniliğini tespit etmiş, ancak henüz ışığın foton olarak belirdiğini kabul etmemişti.)

Öyleyse çizgi tayfları atomlar hakkında bize neyi öğretmektedir? Her atomun kendisine özgü bir enerji düzey dizilimi vardır ve ışık yayınlandığında veya soğrulduğunda da bu düzeyler arasında kuantum sıçramaları gerçekleşmektedir.

Sadece bir elementin, hidrojenin çizgi spektrumu, atomik enerji düzeylerinin teorik değerleriyle tam olarak ilişkilendirilebilecek kadar basittir. 1913 yılında Bohr atomik yapı üzerine çalışmasının taslağını tamamladıktan sonra hocası Ernest

Rutherford'a basım için tereddütlü olduğunu, çünkü sadece hidrojenin spektrumunu açıklayabildiğini, başka hiçbir elementiyse açıklayamadığını söyler. Rutherford'un "Hidrojeni açıklayabiliyorsan eğer, insanlar geri kalanına inanır zaten" yanıtını verdiği söylenir. Sonuç itibarıyla geriye kalanlar için basit hesaplamalara ulaşılamamışsa da, Bohr'un öne sürdüğü devrimci fikirlerin zamanın sınavını aşarak tüm atomlar için geçerli olduğu görülmüştür.

Bohr'un açıklamayı başardığı hidrojen spektrumuna *Balmer dizileri* denmektedir; adını Johann Balmer'dan, 1885 yılında hidrojen tayfının ters dalga boylarında basit bir sayısal düzen olduğunu bulan İsviçreli bir öğretmenden almaktadır. Frekans dalga boyuna ters orantılı olduğu için, onun formülü frekansların (ve bu yüzden, bildiğimiz gibi, hidrojendeki sabit durumlar arasındaki enerji farklarının) düzenini tam olarak göstermekteydi. Bohr bu formülü kullandı. Rutherford'a açıklayabildiğini söylediği de buydu. Şekil 20, hidrojen atomu enerji düzeylerini ve Balmer dizilerine yol açan kuantum sıçramalarını gösteren bir tablodur.



Şekil 20: Hidrojen atomunda daha yüksek enerji durumlarından ikinci düzeye doğru olan kuantum sıçramalar Balmer dizilerine yol açmaktadır.

30. Element tablosu neden periyodiktir?

Elementlerin periyodik tablosu, dışarlama ilkesinin gerçekten olağanüstü bir sonucudur. Nasıl işlediğini anlamak üzere, bir an için Zeus olduğunuzu ve dünyayı yaratma işiyle uğraştığınızı hayal edin. Bir cebinizde tüm olası atom çekirdekleri var, diğer cebiniz de elektronlarla dolu. Başlarken ilk cepten en hafif çekirdeği, tekil bir protonu çıkarıyor ve yanına da bir elektron koyuyorsunuz. Negatif yüklü elektron elektriksel açıdan pozitif yüklü protona çekilir. Belli sayıda fotonu yaydıktan ve bir süreden sonra elektron, hareketin izin verilen kuantum durumları boyunca alt basamaklara iner ve sonunda artık kuantum sıçramaların mümkün olmadığı taban durumuna ulaşır. Orada sıfır yörünge açısal momentuma ve 1/2 birim spine sahiptir ve dalgası bir nanometrenin yaklaşık onda biri büyüklüğünde yayınlanır. Elektronun enerjisi -13,6 eV'dir, bu onu protondan ayırmanın bu büyüklükte bir enerjiyi gerektirdiği anlamına gelir. 13,6 eV niceliğine *bağlanma enerjisi* denir. Siz Zeus, 1 numaralı elementi, hidrojeni yaratmış oldunuz.

Ardından 2 birim elektrik yüklü, iki proton içeren ve tesadüfen iki de nötron içeren bir çekirdek çıkartıyorsunuz. Bir elektron ekliyorsunuz, bu elektron da daha önceki gibi taban durumuna erişmek için alt basamaklara iniyor. Durum hidrojenin taban durumuyla benzeşmektedir, tek fark bağlanma enerjisi dört kat daha büyüktür, yaklaşık 54 eV. Ancak bu birleşim halen net pozitif yüklüdür. Bir atom değil, bir iyondur. Bu yüzden bir elektron daha alıp ekliyorsunuz. Bu da hareketin en alt durumundaki ilk elektronla birleşmek üzere enerji açısından alt basamaklara iniyor. Dışarlama ilkesi burada devreye giriyor. Tüm bu olanların tanrısı olarak siz tekdüze değil, enteresan bir dünya istediğiniz için, iki elektronun aynı anda aynı hareket durumunda olamayacağını buyuruyorsunuz. Ancak bu iki elektronun da bir kaçış numarası sözkonusudur. Aynı hareket durumunda gibi görünmektedirler, ancak gerçekte böyle değildirler. Spinleri ters yönleri işaret etmektedir, böylece yörüngesel hareketleri eş olsa da farklı iki hareket durumunu oluşturmaktadırlar. Yarattığınız helyum atomu sıfır yörünge açısal momentuma ve iki elektron spini zıt yönlere işaret ettiği

için yine sıfır spine sahiptir, ayrıca da yaklaşık 79 eV'luk epey büyük bir bağlanma enerjisine (her iki elektronunu ayırmak için gereken enerji) sahiptir. Hidrojen atomundan daha küçüktür. Yaratmış olduğunuz atom öyle küçük ve öyle sıkı bağlanmıştır ki, kimyasal olarak başka bir atomla birleşmesi pek mümkün olmayan bir atomdur.

İşinize ufaktan ısınmış bir halde bu kez üç proton (ve üç veya dört nötron) içeren bir çekirdeğe üç elektron atıyorsunuz. Bu elektronların ikisi helyum atomundaki elektronların davranışını taklit ediyor. Zıt yönlü spinlerle düşük enerjili durumda çiftleniyorlar. Ancak üçüncü elektron onlara katılamıyor. Dışarlama ilkesi buna izin vermeyecektir. Üçüncü elektron, ilk ikisine göre oldukça büyük enerjili bir hareket durumuna (ve buna uygun olarak çok daha az bağlanma enerjisine) ulaşıyor ve dalgası ekstra bir salınım döngüsü ile çok daha büyük bir boyuta yayınlanıyor. Bu üçüncü elektron ya sıfır ya da 1 birim yörünge açısal momentuma sahip olabilir. Helyum atomundan çok daha büyük olan ve çok daha gevşek bağlanmış olan lityum atomunu yaratmış oldunuz. Bu üçüncü elementin, lityumun kimyasal açıdan çok aktif olduğu ortaya çıkmıştır. *Valans elektron* denilen, en dıştaki elektron diğer atomlarla değişime kolaylıkla katılabilmektedir. Dışarlama ilkesinin dünyayı "tekdüze" olmaktan çıkartıp "enteresan" bir hale getirdiğine dair kanıtımız artık hazır haldedir. Bu ilke olmasaydı, lityum atomundaki üç elektron da sıkıca bağlanmış vaziyette olacak ve lityum diğer atomlarla etkileşim açısından helyumdan bile daha isteksiz olacaktı. Dışarlama ilkesinin varlığını buyurmasaydınız, elektron ve proton sayıları arttığı ölçüde, atomlar daha da sıkı bir biçimde bağlanacak ve kimyasal tepkimeye giderek daha az meyil göstereceklerdi. Çok kasvetli bir dünya olurdu bu.

Elementlerin tablosundaki periyodiklik meselesini açmak için, sizin atom yapıcı Zeus rolünüzü biraz daha ileriye taşımamız gerekiyor. 4, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10 numaralı elementleri imal ettikten sonrasını düşünmeye çalışalım. Lityumdaki bu üçüncü elektron ya sıfır ya da 1 birim yörünge açısal momentuma sahip olabildiği için ve 1/2 birimlik bir spine sahip olduğu için, ulaşabileceği sekiz hareket durumu sözkonusu olur. Sıfır yö-

rünge açısal momentumda iki olası durum vardır, çünkü spin için iki olası yön vardır. 1 birim yörünge açısal momentumda yörünge açısal momentumun üç olası uyumu vardır ve her biri için spinin iki olası uyumu ile altı durum daha, toplamda sekiz durum oluşur. Bu, ardışık olarak daha büyük elektrik yüklü çekirdekler seçtikçe ve daha fazla sayıda elektron ekledikçe, helyumda sahip olduğunuzun üstüne toplam sekiz ekleyebilirsiniz demektir; bu sizi 10 numaralı elemente, neona ulaştırır ve neon da helyum gibi sıkı bağlanmış bir elektron dizisine sahiptir ve kimyasal aktivite için pek az istek gösterir. Helyumdaki iki elektron ilk "kabuğu" işgal ederler; 3'ten (lityum) 10'a (neon) dek olan elementlerin dıştaki elektronları "ikinci kabuk"ta yer alır denmektedir.

Sürecin kavranmasında bir adım daha atarsak sonrası düzlük, diyelim. On bir elektronlu bir çekirdek seçer, ardından buna on bir elektron daha eklerseniz ne olur? İlk iki elektron ilk kabuğa düşer. Sıradaki sekiz elektron ikinci kabuğa düşer. On bir numaralı elektron bu kabuklardan dışlanır. Onun daha yüksek enerjili, daha gevşek bağlanmış bir durumu işgal etmesi gerekir, işte bu da üçüncü kabuğun başlangıcı olur. Başka bir kimyasal olarak aktif element olan sodyumu yarattınız. Sodyum kendisine periyodik tabloda kimyasal olarak aktif lityumun hemen altında bir yer bulur. Neredeyse hareketsiz olan 10 numara neon ise, hareketsiz 2 numara helyumun altında yer alır.

Süreç siz ilerledikçe biraz daha karmaşıklaşır – örneğin kimi kabuklar sekiz yerine on sekiz elektron tutar – ancak temelde tüm periyodik tablo dışarlama ilkesi ve açısal momentumun uyum kuralları tarafından şekillendirilmiştir. Boğuşmak isteyenler için bir soru: 8 sayısı sıfır veya 1 yörünge açısal momentumlu ulaşılabilir durum sayısından gelmekteyse, on sekiz sayısı nereden gelmektedir?

31. Ağır atomlar neden hafif atomlarla neredeyse aynı büyüklüktedir?

Periyodik tabloda ilerledikçe atomların boyutlarında dalgalanmalar görülür. Örneğin lityumdan (3 numara) neona (10 numara) gittikçe atomlar küçülür, sodyumda (11 numara) ise da-

ha büyük boyuta sıçrar. Ancak genel olarak periyodik tablonun bir ucundan diğer ucuna atomlar kabaca aynı boyutta olurlar. Doksan iki elektronu olan uranyum atomu, dört elektronu olan berilyum atomundan çok az bir miktar daha büyüktür.

Atomik boyutlardaki bu akıl karıştıran benzerliğin nedenini açıklamadan önce, atomların en basiti olan hidrojen atomunu ele almamıza izin veriniz. Elektronu en düşük enerjili hareket durumunda (taban durumunda) iken belli bir büyüklüktedir, eğer elektron daha yüksek bir enerji durumuna uyarılmış ise bundan daha büyük bir boyut kazanır. Aslında boyut, uyarılma enerjisi arttıkça hızla büyür. İlk uyarılmış durumundaki (temel kuantum sayısı n=2) bir hidrojen atomunun çapı taban durumunda olduğundan (n=1) dört kat daha büyüktür. İkinci uyarılmış durumda (n=3) çapı durumunda olduğundan dokuz kat daha büyüktür. Laboratuarlarda kuantum sayısı n, 40'tan büyük olan hidrojen atomları tespit edilmiştir. Normal boyutundan 1600 kat daha büyük olan bu dev atomlar çok nadir görülürler, çünkü seyreltik bir gazda bile başka atomlarla karşılaşmalardan sağ kalacak hareket alanına sahip değildirler.

Dışarlama ilkesi yüzünden –elementlerin periyodikliğinden sorumlu olan da aynı ilkedir–elektronlar daha ağır elementler için giderek artan kuantum sayısı durumlarına (ve artan sayıda kabuklara) zorlanırlar. Uranyum atomu için en dıştaki elektronlarda n=7'dir. Öyleyse neden uranyum atomu hidrojen atomundan kırk dokuz kat daha büyük değildir? Çünkü doksan iki protonuyla uranyum çekirdeği elektronlara öyle sert bir biçimde asılır ki, yörüngelerini kendisine çekerek boyutlarını çok hafif atomların boyutlarıyla karşılaştırılabilir hale getirir.

Helyum atomundaki taban durumu elektronlarına karşılık gelen, uranyum atomunun en iç tarafındaki iki elektron, helyumdakine oranla kırk altı kat daha büyük bir kuvvet tarafından çekilmektedirler. Bunun sonucu olarak uranyumdaki ilk kabuk, helyum atomunun boyutunun kırk altıda biri kadardır. Diğer elektronlar daha büyük boyutlu kabuklarda birikirler; bu en dıştaki elektronların çekirdekten uzaklığı, yaklaşık olarak hafif atomdaki az sayıdaki elektronun uzaklığı kadar oluncaya dek sürer.

J. Hans Daniel Jensen (1907–1973). II. Dünya Savaşı'ndan sonra Jensen, Heisenberg'in desteğiyle, 1930'larda Nazi partisine bağlılığından dolayı değil, menfaat için girmiş olduğuna otoriteleri ikna etti. Heidelberg Üniversitesi'nde bir savaş sonrası profesörü olarak Almanya'daki teorik fiziğin canlı ve aktif tutulmasına yardımcı oldu. Jensen, Heidelberg'in dışındaki köylerde en iyi Obstschnaps'ların (meyve likörlerinin) nerede bulunabileceğini pek iyi bilirdi.

32. Protonlar ve nötronlar çekirdek içerisinde nasıl hareket ederler?

Nükleer fiziğin resmi açılışını yapma onurunu, atomlar içerisinde çok küçük bir pozitif merkezin olduğunu ortaya çıkartan Ernest Rutherford'un 1911 deneylerine tanımamız mümkündür. Bu merkezde ne olduğu, sonraki yirmi yıl boyunca gizemini korudu. Nötronun keşfedildiği yıl olan 1932'de fizikçiler çekirdeğin yaklaşık büyüklüğünün yanı sıra, yüksek enerjili çarpışmalarda çekirdeklerin birbirleriyle tepkimeye girerek yeni çekirdekler oluşturabildiklerini biliyorlardı. Çekirdek pozitif yüklü olduğu için, içinde protonların olması gerektiğini öngördüler, endişeyle de olsa öngörülerini devam ettirerek, çekirdeğin elektronlara da sahip olması gerektiğini, yoksa çekirdeğin toplam kütlesi ve toplam yükünün tutmayacağını düşündüler.

Soru 8'de tartıştığımız gibi, James Chadwick'in nötronu keşfi, çekirdeğin elektron içermesi gerekmediğini ortaya çıkardı. Çekirdeğin proton ve nötronlardan oluştuğu anlaşıldı. Fizikçiler elektronları çekirdekten kurtardıktan sonra bir nefeslik rahatlamaya kavuştular belki, ama bu kez de proton ve nötronların ("nükleonların") çekirdek içerisinde kendilerini nasıl organize ettikleri sorusuyla karşı karşıya kaldılar. Katı, sıvı veya gazlara benzer biçimde mi hareket ediyorlardı? Soru 8'de aktardığımız gibi, bir on yıl kadar sıvı damlacığı mode-

Maria Goeppert Mayer (1906–1972), burada 1935 yılında kızı Marianne ile birlikte görülüyor. Almanya'da doğan ve büyüyen Mayer, öğrenci olduğu Göttingen'de tanıştığı Amerikalı kimyacı Joseph Mayer ile evlendi. Kendisi için hiç de kolay olmamasına karşın, baba tarafından ardı ardına üniversite profesörü olan yedinci kuşağın temsilcisi oldu. Rastlantı eseri fiziği sevdi ve itibarlı bir unvan ve hatta kimi zaman ücret dahi almaksızın bu tutkusunu sürdürdü.

li gayet iyi iş gördü ve özellikle de 1938 sonunda bulunan ve 1939 yılında teorik olarak açıklanan nükleer fisyon (bölünme) hesaplamasıyla önemli bir iş gördü.

II. Dünya Savaşı'ndan sonra sıvı damlacığı modelinin kimi kusurları görülmeye başlandı. Fizikçiler, atomlardaki elektronlar gibi, çekirdek içerisindeki proton ve nötronların da kabuklar üzerinde yer aldıklarının kanıtlarına rastlıyorlardı. Bu, sözkonusu nükleer parçacıkların çekirdek içerisinde bir şekilde serbest hareket edebilmelerini gerektiren bir durumdu. Belli sayıda elektronlara sahip olan atomların yaptığına benzer şekilde, belli sayıda proton veya nötron içeren çekirdekler de alışılmadık bir istikrar gösteriyorlardı. Atomlarda kapalı kabuk numaraları 2, 10, 18, 36, 54 ve 86'dır. Bunlar soygazlar adı verilen atomlardaki elektronların sayısıdır: helyum, neon, argon, kripton, ksenon ve radon. Bu atomların her birinde bir kabuk dolmuştur, kabukta ek bir elektron için yer kalmamıştır. Çekirdekteki kapalı kabuk numaraları aynı değildir ve bu ilk kafa karışıklığına sebep olur: 2, 8, 20, 28, 50, 82 ve 126'dırlar. Aslında nükleer kapalı kabuk numaralarına ilk başta *sihirli sayılar* adı verildi, çünkü fizikçiler neden böyle olduklarını çözememiş durumdaydılar. Açıklamayı başaran fizikçiler, birbirlerinden bağımsız olarak, Amerika'daki Maria

Goeppert Mayer[30] ve Almanya'daki J. Hans Jensen[31] yöneticiliğindeki ekip oldu. Her ikisi de (nükleer fizik alanında, ilgisiz başka bir konudaki çalışmasıyla Macar-Amerikalı fizikçi Eugene Wigner'in de kendilerine eklenmesiyle) 1963 Nobel Fizik Ödülü'ne layık görüldüler. Dışarlama ilkesinin, atomlarda olduğu gibi, çekirdekler içinde de kabuk yapısının oluşmasında belirleyici etmen olduğunu, ancak çekirdekler içerisinde spin ve yörünge açısal momentumu birbirine bağlayan bir şekilde farklı kuralların işlediğini fark etmişlerdi.

"Sihirli sayılar" (kapalı kabuk numaraları) protonlara ayrı ve nötronlara ayrı uygulandığı için, bir çekirdeğin "çift sihirli" olması; hem nötronlarının hem protonlarının doldurduğu kabuklar olması mümkündü. En hafif çift sihirli çekirdek, iki proton ve iki nötron içeren helyum-4'ünkidir. Öylesine sıkı bağlı bir yapıdır ki, radyoaktif bir çekirdekten ancak bir birim olarak, bir alfa parçacığı olarak yayınlanabilir ve aynı nedenle evrende geniş bir biçimde dağılım gösterir. En ağır çift sihirli çekirdek, 82 proton ve 126 nötron içeren kurşun-208'inkidir. Bu izotop doğada bulunan en ağır kararlı çekirdektir.

Bir çekirdek nasıl olup da sıvı damlacığı gibi görünmekte, ama aynı zamanda serbest nükleonlara sahip bir gaz gibi davranabilmektedir? Yanıt nükleer kuvvetin (en nihayetinde kuarklar arasında gluonların değiş tokuşundan doğmakta olan)

30 Eşi kimyacı Joe Mayer profesörlüğün keyfini çıkarırken, Maria Mayer yıllar boyunca yarı-zamanlı veya geçici atamalarla yetinmek zorunda kaldı. 1950'lerde nükleer fizik üzerine konuşmak için kendisini ziyaret ettiğimde, biri Argonne Ulusal Laboratuarı ve diğeri Chicago Üniversitesi'nde olmak üzere, iki yarı-zamanlı pozisyonu birden taşıyordu. (Bu, nükleer kabuk yapısında çığır açıcı çalışmasının sonrasında da halen böyleydi.) Nihayetinde hem o hem de eşi San Diego'daki California Üniversitesi'ne profesör olarak atandılar.

31 Hans Jensen, Heidelberg Üniversitesi fizik binasının bir dairesinde yaşayan bir bekârdı. Kendisini ziyaret ettiğimde bana heyecanla Amerika'dan yeni döndüğünü ve orada martininin nasıl karıştırılacağını öğrendiğini söylemişti. Yeni becerisini bana göstermeyi önerdi, ben de kabul ettim. Ardından üç ölçek vermutla bir ölçek cini birleştirerek sıcak servis etti. Maria Mayer'in bu alanda kendisinden çok daha profesyonel olduğunu söyleyebilirim.

doğasında gizlidir. Bu kuvvet, bir proton ya da nötronun çekirdeğin bir tarafından diğer tarafına engelsiz denebilecek bir biçimde süzülmesine izin vermektedir. Ama eğer bir nükleon, nükleon emsallerinin kütlesinden sapma eğilimi gösterirse, o zaman sert ve keskin biçimde tekrar sürüye çekilir. Çekirdeğin kenarlarındaki bu yeğin kuvvet, bir sıvının yüzey gerilimine benzer bir gerilim üretir. Sonuç olarak, içerisindeki parçacıklar bir gazdaki moleküller gibi hareket etse de, bir bütün olarak çekirdek bir sıvı damlacığı gibi titreşerek salınabilir. Çekirdeğin bu ikili doğasının kuramına *birleşik model* veya *kolektif model* adı verilir. Amerikalı meslektaşı Ben Mottelson[32] ile birlikte Niels Bohr'un oğlu Aage, 1975 Nobel Fizik Ödülü'ne birleşik model üzerine olan çalışmalarından dolayı layık görülmüşlerdir.

33. Atom numarası ve (bağıl) atom kütlesi nedir?

Miktarları tanımlarken sembolleri de tanımlayalım. Çekirdekteki protonların toplam sayısı Z ile gösterilir ve *atom numarası* adını alır: Hidrojen için Z=1, helyum için 2, neon için 10, demir için 26, uranyum için 96 vs'dir. Z periyodik tablodaki elementi de açıkça belirler. Şu ana kadar tespit edilen en yüksek Z değerine –en yüksek atom numarasına– sahip element 118 numaralı elementtir, an itibarıyla da henüz resmi ismi konulmamıştır.[33]

Çekirdekteki nötron sayısı N ile gösterilir ve düz biçimde *nötron sayısı* adı verilir. Z+N'nin toplamı, çekirdekteki nükleonların toplam sayısını verir, A ile gösterilir ve *kütle numarası* adı verilir. Hidrojenin en sık rastlanan izotopunun kütle numarası A 1'dir (Z=1, N=0), hidrojenin daha ağır izotopları döteryum ve trityumun kütle numaraları 2 ve 3'tür, sırasıyla

32 Ben Mottelson'la 1944 yılında her ikimiz de fizikte kariyer yapmayı düşünen lise son sınıf öğrencileriyken şans eseri tanışmıştım. Yerleştiği Kopenhag'daki Bohr Enstitüsü'nde İngilizce temel dildi (halen de öyledir). Kendisini orada 1950'lerde ziyaret ettiğimde çocukları şu açıklamayı yaptılar: "Anne ve babamızın bizi anlamasını istemiyorsak Danca konuşuyoruz".

33 Vekâleten ismi Ununoktiyum'dur (bir-bir-sekiz'in Latincesidir).

döteryum için (Z=1, N=1); trityum için (Z=1, N=2)'dir. Karbonun en sık rastlanan izotopu Karbon-12'dir, Z=N=6 ve A=12'dir. Periyodik tablonun yandaki diğer ucuna sıçrarsak, uranyum-238'de Z=92, N=146 ve A=238'dir.

Bağlantılı bir nicelik olarak bir de çekirdeğin gerçek kütlesi olan M vardır. Çıplak çekirdeği ölçmektense, atomların "ağırlığını" elektronlarını dâhil ederek ölçmenin daha kolay olduğu görüldü, böylelikle de kütleler, tüm atomlar için elektronları dâhil edilerek hesaplandı. Her halükarda elektronlar, atomun kütlesinin çok küçük bir bölümü kadar bir ağırlığa sahiptirler. Büyük ölçek kütle birimi, kilogram, atom kütlelerini tanımlamak için faydalı olmaktan devasa bir biçimde uzak olduğu için, *atom kütle birimi* veya *akb* (amu) olarak adlandırılan yeni bir birim belirlendi.[34] Bu birim, karbon–12 atomunun atomik kütlesi *tam olarak* 12 akb olacak şekilde tanımlandı. Bu tanımla hidrojen izotoplarının atom kütleleri 1, 2 ve 3'e yakındır; oksijen-16'nın atom kütlesi 16'ya yakındır ve uranyum-238'in atom kütlesi 238'e yakındır. Başka bir deyişle atom numarası olarak A tamsayısı, kabaca bir atomun akb cinsinden gerçek kütlesi M'ye eşittir. Örneğin oksijen-16'nin atom kütlesi 15,9949; berilyum-9'un 9,0122'dir. (Her ikisi de burada verilenden daha büyük bir kesinlikle ifade edilmektedir.) Atom kütleleri ve kütle numaralarının *tam olarak* aynı olmamasının nedeni, nükleer bağlanma enerjisinin çekirdek kütlesine katkıda bulunmasıdır.

İzotop kelimesini dikkatlice tanımlamadan kullandık. Birincisi bir element, tüm atomları belirli bir sayıda proton içeren bir materyal olarak tanımlanır. Başka bir deyişle, atom numarası Z elementi tanımlar. Verili bir elementin farklı izotopları olabilir, bu çekirdeğindeki nötronların sayısına bağlıdır. Uranyumun ünlü iki izotopu, örneğin, U–235 ve U-238'dir. Uranyum atomlarının her biri doksan iki proton içerir. İki izotopun atomları ise, sırasıyla 143 ve 146 nötron içerir. Karbonun en sık rastlanan izotopu karbon-12'dir, onun çekirdeği altı proton ve altı nötron içerir. Eski eserleri tarihlemek için kullanılan ve daha nadir bulunan karbon–14 izotopu altı pro-

34 1 akb, $1{,}66 \times 10^{-27}$ kg'a eşittir.

ton ve sekiz nötron içeren bir çekirdeğe sahiptir. Radyoaktiftir, karbon-12'nin çekirdeği ise radyoaktif değildir.

Yüksüz bir atomdaki elektronların sayısı ve dizilimi sadece çekirdekteki protonların sayısına bağlı olduğu için, atomların çevreleyen bünye içindeki davranışı nötron sayısına hemen hiç bağlı değildir. Bu yüzden karbon–12 ve karbon–14 aynı kimyasal bileşiklere girerler ve grafit ya da elmas oluşturma açısından her ikisi de eşit uygunluktadır. Elementi tanımlayanın sadece proton sayısı olmasının nedeni budur. (Kimyasal davranış nötron sayısından *tamamen* bağımsız değildir, çünkü izotoplar arasındaki kütle farkları küçük bir rol oynayabilir.) Ancak çekirdeğin kendisi ayrı bir yapı olarak ele alındığında, izotopsal farklar büyük önem taşıyabilir. Kurşun-209'un çekirdeği, örneğin, bir "valans" nötronuyla, kurşun-208'in çekirdeğinden çok farklı özelliklere sahiptir. İzotoplar arasındaki en önemli fark, karbon–12 ve karbon-14'de olduğu gibi, radyoaktif olup olmamalarıdır. Elementlerin çoğu birden fazla izotopa sahiptir. Seksen element, en az bir kararlı izotopa sahiptir ve *her* elementin en az bir veya daha fazla kararsız (radyoaktif) çekirdeği vardır. Bilinen elementler bazında üç binden fazla izotop tanımlanmıştır, bunlardan 256'sı kararlıdır. Bu atomik çekirdeklere yoğunlaşan bir nükleer fizikçi, "uzak" elektronları ve atomların kimyasını, bir yeryüzü jeoloğunun güneş sistemi ve galaksiyi ihmal etmesine benzer şekilde göz ardı edebilir.

VI. Bölüm

Çekirdeklere Devam

34. Periyodik tablo niçin son bulur?

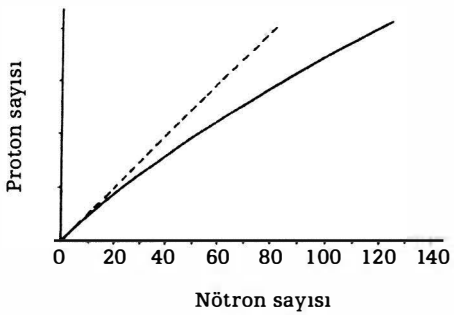
Periyodik tablonun sonlanmasının (şu ana dek bilinen tüm elementler için Z=118'de, kararlı elementlerde[35] Z=82'de) elektronlarla hiçbir ilgisi yoktur, nedeni tamamen çekirdeklerle ilgilidir ve özellikle protonlar arasındaki elektrik itki ile bağlantılıdır. Yeğin nükleer kuvvet protonları birbirine, nötronları birbirine ve nötronları da protonlara doğru çeker. Kısacası tüm nükleonları birbirine bağlama işlevi görür. Etkisi çok uzağa erişmez, hatta büyük bir çekirdeğin bir ucundan diğer ucuna bile ulaşmaz. Sadece nükleonlar birbirine yakınken etkimektedir. Protonlar arasındaki elektrik itki nükleer kuvvetten daha zayıf, ancak daha uzak erimlidir. Ağır bir çekirdekte protonların her biri, tüm diğer protonların itki kuvvetlerini hisseder.

35 43 ve 61 numaralı elementler (teknetyum ve prometyum) kararlı izotoplara sahip değildirler. Sonuncusu 82 numara olmasına karşın, toplam seksen kararlı element olmasının nedeni budur.

Dışarlama ilkesi, protonlar arasında ve nötronlar arasında etkili olur, ancak protonlar ile nötronlar arasında etkimez. Çekirdeğin içinde iki proton aynı hareket durumuna sahip olamaz; benzer şekilde iki nötron da aynı hareket durumuna sahip olamaz; ancak bir proton ile bir nötron için böyle bir sınır yoktur ve aynı hareket durumunu paylaşabilirler. Bu, elektrik kuvvet engel olmuyor olsaydı, en kararlı çekirdeklerin tümünün eşit sayıda nötron ve protona sahip olacağı anlamına gelmektedir. Böyle bir durumda nötronlar ve protonlar kendi kabuklarında toplanabilir, her biri dışarlama ilkesine uyar ve aynı zamanda serbestçe de birbirlerine karışabilirlerdi. Kararlı bir demir çekirdeği, yirmi altı proton ve yirmi altı nötrona sahip olurdu. Kararlı bir uranyum çekirdeği, doksan iki proton ve doksan iki nötrona sahip olurdu. Nötron ve protonların bir araya gelerek daha büyük çekirdekler oluşturmaları açısından da hiçbir sayısal sınır olmazdı. 548 numaralı element, 548 proton ve 548 nötron içeren bir çekirdeğe sahip olurdu. Elementlere isim veren uluslararası heyetin iş yükü de epey büyük olurdu.

Şimdi protonların birbirini geri püskürttüğü gerçek dünyaya dönelim. Proton ve nötronların sayısal eşitliğinin baskın görüldüğü daha hafif çekirdeklerde, karşılıklı itki görece önemsizdir: iki proton iki nötronlu helyum–4, sekiz proton sekiz nötronlu oksijen–16 ve her ikisinden onar tane olan neon–20 örnek verilebilir. Ancak protonların sayısı arttıkça karşılıklı itki, eşit sayıda nötron ve proton olması eğilimini alt ederek göreli olarak daha fazla önem kazanır. Daha ağır çekirdeklerde nötronların sayısı protonların sayısını geçer, çekirdek ne kadar ağırsa dengesizlik o kadar artar. Sık rastlanan demir izotopu demir-56'da, otuz nötron bulunur; nötron sayısı 26 protona oranla yüzde 15 daha fazladır. Daha önce bahsettiğimiz uranyum–238 izotopunda 146 nötron vardır, doksan iki protonun yüzde 59 daha fazlası. Neticede protonlar arasındaki itme kuvveti öyle büyüktür ki, kararlı çekirdek kalmaz. Kararlı çekirdekler olmadı mı, uzun süre dayanan atomlar da olmaz ve bilim insanlarının incelemesine uygun element de kalmaz.

Nötron sayısı N'nin yatay, proton sayısı Z'nin dikey ekseni oluşturduğu bir grafik oluşturarak (*bkz.* Şekil 21), kararlı çekir-



Şekil 21: Kararlı çekirdeklerde proton ve nötron sayıları. Bu "kararlılık çizgisi" bükülür ve sonlanır.

dekleri gösteren bir şekil oluşturabiliriz. Protonların birbirini itmediği varsayımsal dünyada bu "kararlılık çizgisi", kararlı çekirdeklerde nötron ve proton sayıları eşit olduğu için (N=Z), 45 derecelik bir açı ile doğrusal olur. Bu durum şekilde kesikli bir çizgi ile gösterilmiştir. Gerçek dünyada, şekilde koyu çizgi ile gösterildiği üzere, proton itkisi kararlılık çizgisinin *bükülmesine* ve *sonlanmasına* sebep olur. Bükülür; çünkü nötron sayısı N proton sayısı Z'ye oranla giderek daha fazla artmaktadır. Sonlanır; çünkü belli bir noktadan sonra çekirdeğin içine -nötronların yardımıyla dahi olsa- daha fazla proton girmesinin imkânı yoktur.

Nötronlar, protonları kendilerine yakın tutarak çekirdek içerisine ek çimento ekleme rolleri ile kararlılık çizgisini uzamasını sağlarlar. Ayrıca, bir anlamda çekirdeklerin var olmasının sorumlusu da onlardır. Nötron olmasaydı, helyum ve diğer ağır elementler de var olmazdı. Evren sadece hidrojenden oluşur, gezegenler ve insanlar hiç var olamazlardı. Bunun nedeni, iki protonun bir çekirdek oluşturmak üzere kendi başlarına birbirlerine bağlanamamalarıdır. Helyum–2 çekirdeği (iki proton ve sıfır nötron) gibi bir şey yoktur. Elektrik itki, göreli olarak zayıf olmasına karşın, iki protonun kendi başlarına birleşmesini engellemeye yetecek kadar güçlüdür. Ancak bir veya iki nötron onlara katılırsa, protonlar birbirlerine bağlanabilirler. Helyum–3 (iki proton ve bir nötron) ve helyum–4 (iki proton, iki

nötron) çekirdekleri kararlıdır ve bir anlamda tüm daha ağır çekirdeklerin inşası için bir platform sunarlar.

Basit birkaç gerçekten ve birkaç sade ilkeden ne harikalar doğuyor. Nötronlar olmasaydı, hidrojenden başka bir element var olamazdı. Dışarlama ilkesi ve açısal momentumları (*momenta*) birleştirme kuralları olmasaydı, çok donuk ve hareketsiz bir atomlar dizisi olur, periyodik tablo olmaz, dünya yaşam ve renk taşımazdı. Protonun yükü olmasaydı, elektronların atomlar içerisinde toplaşması sözkonusu olamaz ve çekirdekler hiçbir işe yaramayan sonsuz sayıda olurlardı.

35. Radyoaktivite nedir? Biçimleri nelerdir?

Bir çekirdek kararsızsa, kendisini (yarı-ömürlü) daha kararlı bir şeye dönüştürür. Buna radyoaktivite denir. Süreç ismini, henüz çekirdeğin varlığı bilinmeden önce almıştır. On dokuzuncu yüzyılın sonunda Ernest Rutherford ve Marie Curie gibi bilim insanları, kimi ağır elementlerin kendiliğinden "radyasyon" (*ışınım*) yaydığını keşfettiler. Rutherford, henüz ışınımın doğası hakkında ayrıntılı bilgiye sahip olmaksızın keşfedilen ilk iki çeşide - Yunan alfabesinin ilk iki harfinden yola çıkarak - *alfa* ve *beta* adını verdi. Daha sonra Fransız kimyacı Paul Ulrich bir üçüncü ışınım çeşidini keşfetti, mantıki olarak da buna *gama* adını verdi. Ardından araştırmacılar bu "ışınların" doğasını saptamaya başladılar. Alfa ışınları helyum çekirdekleridir; iki proton ve iki nötron birbirine bağlıdır, bunlara halen *alfa parçacıkları* diyoruz. Beta ışınları elektronlardır, kimi durumlarda bunlara da hala *beta parçacıkları* diyoruz. Gama ışınları ise elektromanyetik ışınımdır, bugün bunların yüksek-enerjili protonlar olduğunu biliyoruz (ve halen de *gama ışınları* olarak adlandırıyoruz).

Alfa ve beta bozunumu "dönüşüm" içerirler; başlangıç çekirdeği ile son çekirdek farklı elementlerdir. Gama bozunumu ise elementi değiştirmeden bırakır. Bu, basitçe çekirdekte daha yüksek bir enerji durumundan daha alçak olana doğru bir kuantum sıçramasıdır: atomdaki elektronların kuantum sıçramalarına benzer, ancak neredeyse bir milyon kere daha büyük bir enerjidir.

Marie Curie (1867–1934), tüm zamanların hak edilmiş üne sahip en büyük kadın bilimcilerinden biri ve bilim alanında iki Nobel Ödülü (1903'te fizik, 1911'de kimya alanında) birden kazanmış olan üç insandan birisidir. O ve eşi Pierre radyum (atom numarası 88) ve polonyum (numara 84) elementlerini keşfettiler; sonuncusunun adı Curie'nin anavatanı Polonya'dan gelir. Marie Curie'nin anısına 96 numaralı elemente küriyum adı verilmiştir.

Radyoaktivite neden olur? Ne işe yarar? İzin verirseniz alfa ve beta bozunumunu ayrı ayrı ele alalım.

Alfa bozunumu özellikle çok ağır olan, 83 numaralı ve ötesindeki elementlerde gerçekleşir. Bu gerçekten çekirdek için protonları dökmenin bir yolu gibidir, çünkü periyodik tablonun çekirdekteki proton itkisinin çekirdeği zar zor kararlı, hatta kararsız kıldığı bölümünde gerçekleşmektedir. Burada $E=mc^2$ çok ilginç bir biçimde devreye girmektedir. Çok fazla protonu olan çekirdek, bir protondan kurtulmayı "arzu ediyor". Ama bunu öyle yapamıyor. Bir çekirdek, içerisinde yer alan parçacıkların kütlelerinin toplamından daha az bir kütleye sahip. Bu, çekici nükleer kuvvetin bir bağlanma enerjisi yaratmasından kaynaklanıyor. Aslında çekirdek içerisindeki nükleonlar, birbirlerine dönük çekimlerinden dolayı serbest oldukları zamana göre daha az kütleye sahipler. Dolayısıyla bir proton dışarı atılmışsa, protonun dış dünyadaki kütlesine kavuşması için, dışarı atan çekirdeğin bir miktar fazladan enerji bulması gerekir. Bu süreci durdurur. Aynısı tek bir nötron veya bir çift protonun atılmasını da engeller. Ancak her şey kaybedilmiş değildir. Çekirdeğin protonlardan kurtulmasının bir yolu vardır. İki nötronla sıkıca bağlı iki protonu – bir alfa parçacığını – dışarı atabilir, çünkü alfa parçacığının sahip olduğu nükleonlar serbest olduklarından daha az kütleye sahiptirler. Çekirdeğin alfa parçacığının

dışarı çıkışını sağlamak için ekstra enerji bulması gerekmez. Fırlattığı, kendi başına önemli bir bağlanma enerjisine sahip, sıkıca bağlı bir yapıdır. Nötronlar yardımcı rolü üstlenirler. Çekirdek, nötronlardan kurtulmak için (biraz antropomorfize ederek insani nitelikler atfedersek) özel bir güdüye sahip değildir, ancak protonlardan kurtulma amacına erişmek için nötron kaybını kabullenmek zorunda kalır.

Birçok ağır çekirdeğin aşırı bir hızla alfa bozunumuna uğramasını engelleyen yegâne şey, elektrik kuvvet bariyeridir. Nükleer kuvvet tarafından geriye çekildiği için, bir alfa parçacığının çekirdeğin yüzeyinden birazcık uzaklaşması bile büyük bir enerji gerektirirdi. Kaçışını gerçekleştirmek için parçacık, bariyeri "tünelle aşarak" nükleer yüzeyden çok daha uzakta belirmesi gerekir ki, oradan serbestçe uçabilsin. Soru 26'da bahsettiğimiz gibi, 1928 yılında Britanya ve Amerika'dan fizikçiler tünelleme yoluyla alfa bozunumu kuramını geliştirdiler. Her şey olasılığa bağlıydı. Klasik bakışla, alfa bozunumu hiç gerçekleşemezdi. Kuantum mekaniksel yorumla, bir olasılık dâhilinde gerçekleşebilirdi. Bu birçok örnekte çok düşük bir olasılıktır. Örneğin uranyum-238'in alfa bozunum yarı ömrü 4,5 milyar yıldır, tesadüfen dünyanın yaşı ile aynıdır.

Radyum–226 iyi bilinen, daha kısa ömürlü bir alfa yayıcıdır. Onun radon-222'ye bozunumu bir tepkime denklemi olarak şöyle ifade edilir:

$$_{88}\mathbf{Ra}_{138}{}^{226} \rightarrow {}_{86}\mathbf{Rn}_{136}{}^{222} + \alpha$$

Kimyasal sembollerin sol altlarındaki rakamlar atom numarasını –bir diğer deyişle çekirdekteki protonların sayısını göstermektedir. Sembollerin sağ altlarındaki rakamlar, nötron sayısını vermektedir. Üstteki rakam kütle numarası, bu ikisinin toplamıdır; bir diğer deyişle çekirdekteki nükleonların toplam sayısıdır. Bu sürecin yarı ömrü yaklaşık 1600 yıl sürer. Bozunumun ürünü radon–222'nin kendisi de bir alfa yayıcıdır, yarı ömrü 3,8 gündür. Burada gösterilen süreç, uranyum–238 ile başlayıp kurşun–206 ile sonlanan, uzun bir zincirleme radyoaktif bozunumun sadece bir parçasıdır.

Beta bozunumu fiziği çok daha farklı olduğu gibi, beta bozunumu örnekleri de çok daha fazla sayıdadır. Bilinen beta yayıcıların yüzlercesi, periyodik tablonun bir ucundaki hidrojen–3'den (trityum) başlayıp diğer ucundaki en ağır elementlere, "transuraniklere" kadar uzanır. Beta bozunumu zayıf etkileşimin bir sonucudur; zayıf etkileşim, nötron ve protonlarda olduğu gibi, elektron ve nötrinolarda da görülür. Bu etkileşim, çekirdek içerisindeki proton ve nötron sayılarının dengesiz dağıldığı durumlarda radyoaktiviteyi tetiklemektedir. *Dengesiz dağılım* sözü ile ne kastettiğimizi bir örnekle anlatabiliriz. Toplam on dört nükleon içeren bir çekirdek düşünün. Kütle numarası 14 olan en kararlı çekirdek azot-14'dür, yedi proton ve yedi nötron içermektedir. Hafif elementler için tipik olduğu üzere, eşit sayıda proton ve nötrona sahiptir. Aynı kütle numarasına sahip olan başka bir çekirdek karbon-14'dür, altı proton ve sekiz nötrona sahiptir. Proton ve nötron bileşkesi "dengesizdir"; karbon-14'ün nötronlarından biri yerini bir protona bırakmış olsaydı, daha kararlı bir çekirdek oluşturulabilirdi. İşte zayıf etkileşim sayesinde bu gerçekleşebilir. Karbon-14'ün beta bozunumunda bir elektron ve bir karşı nötrino yayınlanır ve bir nötron bir protona dönüşür. Süreç, tepkime denklemi olarak şöyle gösterilir:

$$_{6}C_{8}^{14} \rightarrow {}_{7}N_{7}^{14} + e^{-} + \bar{\nu}$$

Yunan alfabesinden ν (nu) nötrinoyu simgeler, sembolün üzerindeki çizgi ise bir karşı parçacık olduğunu belirtir. Sürecin yarı ömrü 5730 yıldır; (çok eski olmasa da) eski çağlardan kalma eserlerin radyoaktif tarihlendirmesinde kullanılma yönüyle mükemmel bir araçtır. Karbon–14 atmosferde yenilenerek takviye olur, ancak kesildikten sonra bir ağaçta aynısı geçerli olmaz. Böylelikle ağaçtan yapılmış tarihsel bir kalıntının karbon–14 tüketimi, bize bu parçanın canlı bir ağaçtan kesilmesinden bu yana geçen süreyi verir.

Nötronlar ve protonlar diğer yönde de dengesiz dağılmış olabilirler. Atom kütlesi 18 olan çekirdekler buna örnektir. Bu kütle numarasında nötronun çok az daha fazla olması tercih

edilir; dolayısıyla sekiz proton ve on nötrona sahip oksijen–18, dokuz proton ve dokuz nötrona sahip flor–18'e göre biraz daha kararlıdır. Flor–18 kendisini oksijen-18'e (110 dakikalık yarı ömürle) şu şekilde dönüştürecektir:

$$_{9}F_{9}^{18} \rightarrow {}_{8}O_{10}^{18} + e^{+} + \nu$$

Bir pozitron (karşı elektron) ve bir nötrino yayınlanır.

Beta bozunumunun üçüncü bir yolu daha vardır; o da bir protonun yerini bir nötronun alması yoluyla bir çekirdeğin daha kararlı hale getirilmesi esnasında gerçekleşir. Buna *elektron kapma* denir. Flor-18'in yaptığı gibi bir pozitron yaymak yerine, çekirdek atomun içerisinden bir elektron yutabilir. (Her iki durumda da nükleer yükün azaldığına dikkat ediniz.) Bu örneğin argon–37 kendisini klor-37'ye dönüştürdüğünde görülür:

$$_{18}Ar_{19}^{37} + e^{-} \rightarrow {}_{17}Cl_{20}^{37} + \nu$$

Artık çekirdekteki protonlar arasındaki itkinin önem kazanmaya başladığı kütle numarası 37 olan bu durumda, klor-37'deki üç nötron fazlalığı, argon-37'deki sadece bir nötron fazlalığına tercih edilir.[36] (Bu süreci takiben klor–37 atomu kendisini bir iç elektron kaybetmiş olarak bulur. Sonuç olarak atom tarafından X-ışını yayınlanması, bu sürecin tespit edilmesini mümkün kılmaktadır.)

36 1970'lerde Raymond Davis bu tepkimenin tersini kullanarak ilk kez Güneş'ten gelen nötrinoları saptamayı başardı (ve bu başarı ona 2002 Nobel Fizik Ödülü'nü kazandırdı). Davis'in South Dakota'daki bir madende kurulu yüz bin galonluk kuru temizleme sıvısı içeren deposu bolca klor–37 içeriyordu. Nadir görülen nötrino soğurma olaylarının gerçekleşmesi için birkaç ay bekledikten sonra, birikmiş az miktardaki argon-37'i sıvıdan ayrıştırdı ve bu izotopun otuz dört günlük yarı ömürle tekrar klor-37'ye radyoaktif dönüşümünü tespit etti.

36. Nötron çekirdek içerisinde kararlıyken, yalnız olduğunda neden kararsızdır?

Nötron -en az- bir açıdan tüm parçacıklar arasında olağanüstü bir konuma sahiptir. Yalnız başına yaklaşık on beş dakikalık bir sürede bozunuma uğrarken, çekirdeğin içerisinde ise sonsuza dek yaşamaktadır.[37] Bu açıdan vahşi doğada hayatta kalmayı başaramayan, ancak hayvanat bahçesindeki bir kafeste yaşayabilen hayvanlara benzetilebilir.

Burada da meselenin düğüm noktası, nükleer dünyada genellikle olduğu gibi, kütle ve enerji ile ilintilidir. Enerji birim cinsinden bir nötronun kütlesi 936,6 MeV, bir protonun kütlesi ise 938,3 MeV'dir; protonun kütlesi 1,3 MeV veya yüzde 0,1 daha azdır. Bu küçük fark nötronun bozunumuna olanak vermektedir. Tepkime denklemi şu şekildedir:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

Elektronun kütlesi 0,5 MeV'lik bir enerji emer, karşı nötrinonun kütlesi ise çok daha azdır; dolayısıyla bu "tepe aşağı" bozunumdan geriye, yaratılan üç parçacığın aksi tesirini karşıladıktan sonra, 0,8 MeV kalır.

Şimdi bir nötron bir protonla birleşerek, yalnız proton haricindeki en basit çekirdek olan bir döteronu oluştursun. Bu iki parçacığın bileşkesi, 2,2 MeV'lik bir bağlanma enerjisi tarafından sağlanır. Bu, döteron oluşturulduğunda 2,2 MeV'nin harcandığı ve tersinden döteronun bir nötron ve bir protona parçalanması için 2,2 MeV eklenmesi gerektiği anlamına gelir. Bu aynı zamanda döteronun ($E=mc^2$ yüzünden) onu oluşturan iki parçacığın kütlelerinin toplamından daha az bir kütleye sahip olduğu anlamına gelir. Peki, nötron döteron bozunumunda, niçin "vahşi doğada" döteronu bir çift protona (ek olarak bir elektron ve bir karşı nötrinoya) çevirirken olduğu gibi davranamaz? Çünkü bu onun için kütlede "tepe

37 Bozunumları esnasında nötronun kaybolduğu radyoaktif çekirdekler de vardır; ancak aslına bakılırsa böylesi durumlarda bozunuma uğrayan sadece nötron değil, tüm bir çekirdektir.

yukarı" gitmek olurdu. Hesaplamasını yapalım (MeV birim cinsinden):

Proton kütlesi	938,3
Nötron kütlesi	939,6
Eksi bağlanma enerjisi	-2,2
Döteronun kütlesi	**1875,7**

İki protonun kütlesi	1876,6
Elektronun kütlesi	0,5
Karşı nötrinonun kütlesi	~0,0
Varsayımsal bozunumun ürünlerinin kütlesi	**1877,1**

Varsayımsal bozunumun ürünleri 1877,1 MeV, döteronun kütlesinden fazla; dolayısıyla bozunum gerçekleşmez.

Önemli bir konuyu atladık. Döteron bozunumunu sonucu ortaya çıkan iki protonun birbirlerine tutunarak bir "di-proton"[38] oluşturup oluşturmayacağı, bunun bağlanma enerjisinin yukarıdaki ikinci kısımdaki toplamı azaltarak bozunumu varsayımsal değil, gerçek kılıp kılamayacağı merak edilebilir. Soru 34'de vurguladığımız gibi, kararlı bir di-proton yoktur. İki proton arasındaki elektrik itki, aralarındaki nükleer çekime üstün gelir ve farklı yönlere uçuşurlar. Dolayısıyla gerçekte döteron bozunuma uğrayamaz. İçindeki nötron kararlıdır ve sonsuza dek yaşar. Evren bugün milyarlarca yıl önce - Büyük Patlama'dan uzun olmayan bir süre sonra - ortaya çıkmış, sayılamayacak kadar çok döteron içermektedir. Nötronları, protonlara sarılı halde, çağlar boyu varlığını sürdürmüştür.

Görüldüğü üzere di-nötron da yoktur. İki nötron, aralarında elektrik itki olmamasına karşın, birbirine tutunmaz. Bunun nedeni iki nükleon arasındaki nükleer kuvvetin, ters yönde olmaları durumuna nazaran, spinleri aynı yöndeyse biraz daha

38 Var olmuş olsaydı di-proton, helyumun en hafif izotopunun çekirdeği olurdu.

büyük olmasıdır. Bir nötron ve bir proton için bu hoş görülebilir. Döteron içerisindeyken spinleri hizalıdır ve toplamda 1 değerini alır (1/2 + 1/2). Ancak dışarlama ilkesi bir nötron çiftinin en düşük enerji durumlarında eş spin yönlerine sahip olmasını engeller. Aralarındaki kuvvetin kendilerini birlikte tutmaya tam olarak yetmediği zıt yönlü spinlerle birleşmeleri gerekir. Döteron, kararlılığın bıçak sırtında yer almaktadır.

Daha ağır çekirdeklerde, her ne kadar bağlanma enerjisinin ortaya çıkardığı kütle değişiklikleri halen küçük olsa da, döterona göre biraz daha büyüktür; daha ağır çekirdeklerde nötronun kararlılığının daha "sağlam" olması da bu yüzdendir. Örneğin bir alfa parçacığının bağlanma enerjisi 28 MeV veya nükleon başına 7 MeV'dir ve bu döterondaki nükleon başına 1 MeV'den çok daha büyük bir miktardır. Alfa parçacığının (helyum çekirdeğinin) ötesinde, karbon ve oksijen çekirdeklerinde nükleon başına bağlanma enerjisi yaklaşık 8 MeV'ye tırmanır, demir ve nikelde 9 MeV ile doruk noktasına ulaşır, en ağır çekirdeklerde ise aşamalı olarak tekrar yaklaşık 7 MeV'ye düşer.

Nötronun kararlı hale gelmesi olmasaydı, sadece hidrojenden oluşan donuk bir evrene sahip olurduk; hem de bu soğuk hidrojen olurdu, çünkü enerji açığa çıkaracak ve yıldızları aydınlatacak nükleer birleşme (füzyon) de olmazdı. Nötron gerçekte olduğundan biraz daha fazla kütleli veya nükleer kuvvet biraz daha zayıf olsaydı, nötronun kararlı hale gelmesi olmazdı, biz de var olmazdık. Uyarıcı bir fikir!

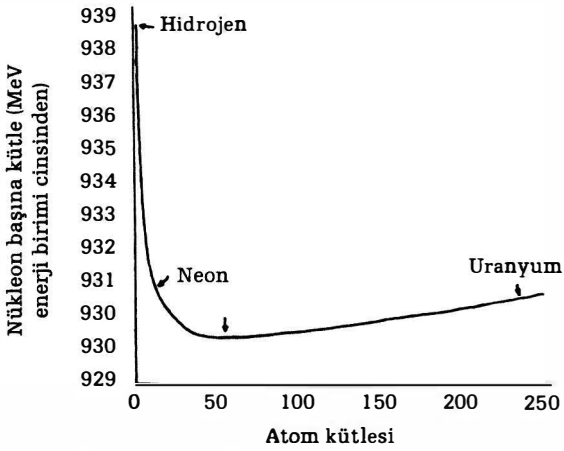
37. Nükleer bölünme (fisyon) nedir? Neden enerji açığa çıkartır?

Çekirdek içerisindeki çekici nükleer kuvvetlerle itici elektrik kuvvetler arasındaki çelişki, çekirdeklerin davranış ve özelliklerini açıklamakta önemli bir yol kat etmemizi sağlıyor. Daha önce ele aldığımız gibi, hafif çekirdeklerde proton ve nötronların neden aynı sayılarda toplaştığını, ağır çekirdeklerde nötron sayısının proton sayısından neden daha fazla olduğunu, alfa ve beta ışınımının neden gerçekleştiğini ve periyodik tablonun neden sonlu olduğunu açıklayabiliyoruz. Açıkladığı önemli bir konu daha var: Ağır çekirdeklerin bölünmesi ve ha-

fif çekirdeklerin birleşmesinin neden enerji ortaya çıkardığı. *Fisyon* (bölünme) ve *füzyon* (birleşme) taşıdıkları isimlerin öngördüğüyle hemen hemen aynı anlamı taşırlar. Nükleer fisyon, bir ağır çekirdeğin daha hafif parçalara bölünmesidir. Nükleer füzyon (bir sonraki soruda ele alınacaktır), hafif çekirdeklerin daha ağır bir çekirdek oluşturmak için birleşmesidir.

Fisyon ve füzyonu kavramak için, nükleon başına kütle kavramıyla boğuşmak fayda sağlar. Soru 36'da vurgulandığı gibi, çoğu çekirdek için bağlanma enerjisi 7 MeV ile 9 MeV aralığında yer alır (döteron için ise nükleon başına sadece 1 MeV'dir). Bağlanma enerjisinin etkisi ($E=mc^2$ sayesinde), çekirdeğin kütlesini azaltır. Bu her nükleonun diğerleriyle birleştiğinde biraz kilo vermesine benzetilebilir. Bir sosyal birliktelik reklâmında rol alan nötron "939 MeV ağırlığındaydım, ama şimdi dostlara katıldıktan sonra, sadece 931 MeV çekiyorum" repliğini söyleyebilir. Nükleon başına ortalama kütlenin nasıl hesaplandığını görmek için, birbirlerinden iyi ayrılmış sekiz proton ve sekiz nötronu gözünüzün önüne getirin. Belli bir toplam kütleye sahiptirler. Onları bir oksijen çekirdeği oluşturmak üzere bir araya getirirseniz, daha küçük bir toplam kütleye sahip olurlar. Bu yeni toplam kütleyi on altıya bölün, oksijen çekirdeğinin nükleon başına kütlesini elde edersiniz. Tuğladan yapılmış bir duvarın kütlesini duvarı oluşturan tuğlaların sayısına bölerseniz, tek bir tuğlanın kütlesini elde edersiniz. Bir çekirdeğin kütlesini "tuğlalarının" (nükleonlarının) sayısına bölerseniz, tek bir izole nükleer "tuğla"nın kütlesinden daha küçük bir sonuca ulaşırsınız.

Şekil 22, hidrojenden uranyuma doğru sıralanan elementlerde nükleon başına ortalama kütleyi göstermektedir. Dikey ölçek, periyodik tablonun bir ucundan diğer ucuna gerçekleşen göreli küçük değişiklikleri vurgulamak için, seçili olarak hazırlanmıştır. Soldaki keskin uç noktadan (tekil proton, hiç de zayıflamamış) en alttaki 26 numaralı element (demir) çevresindeki "kütle vadisine" dek olan değişme, yüzde 1'den daha azdır. Bahsedilen vadiden yukarı-sağa 92 numaralı elemente (uranyum) doğru olan açıda değişim yüzde 0,2'dir. Bu değişiklikler, yüzdesel olarak küçük olsalar da, çok büyük bir önem



Şekil 22: Çekirdekte "tuğla" (nükleon) başına kütle sabit değildir. Demirde minimum değerine düşer, daha ağır çekirdeklerde ise artar.

taşımaktadırlar. Soldan-sağa doğru olan tepe aşağı kayma sayesinde yıldızlar parlamakta ve hidrojen bombaları patlamakta olduğu gibi, insanlık günün birinde kontrol altına alınmış füzyon gücünü elde edebilecektir. Sağdaki sağdan-sola tepe aşağı kayma sayesinde ise atom bombaları patlamakta ve nükleer güç santralleri sayılamayacak megawatt büyüklüğünde bir elektrik gücünü sağlayabilmektedir.

Önce fisyonu düşünün. Şekil 22'deki grafiğin sağ tarafında yer alan bir çekirdek iki küçük parçaya bölünürse, parçaların her biri grafikte daha solda yer alacak ve nükleon başına kütleleri daha az olacaktır. Dönüşüm; şekilde resmen olduğu gibi, kütle açısından da tepe aşağı olacaktır. Enerji salıverilecektir. O zaman soru "neden hemencecik ve hızlıca olmadığı" olacaktır. Aslında ağır çekirdeklerin bazılarında kendiliğinden fisyon gerçekleşir, ama bu hızlı olmaz. Yarı ömürler tipik olarak yıllar, bin yıllar veya daha fazla sürer. Çekirdeğin bir alfa parçacığı yaymak ya da daha eşit parçalara bölünmek için, enerji bariyerini tünel yoluyla aşması gerekir; bu da çok düşük olasılıklı bir süreçtir. Periyodik tabloda uranyumdan sonra yer alan elementlerde - hepsi radyoaktiftir - alfa bozunumuna sık rastla-

nır. İçlerinden birkaçı için bozunumun temel biçimi kendiliğinden fisyondur.

Bazı çekirdekler için, enerji bariyeri içinden tünelle geçmekten başka, engelin üzerinden aşmalarını sağlayan bir yol daha vardır. Bir örnek olarak uranyum–235 çekirdeğini düşünün. Kendi başına bırakıldığında kendiliğinden fisyona maruz kalabilmesi için 100 milyon milyar yıllık yarı ömür gerekir.[39] 5 MeV veya daha fazla enerji kazanırsa enerji bariyerinin üstesinden gelebilir ve saniyenin milyarda birinin milyarda biri kadar kısa bir süre içerisinde fisyona uğrar. Bu enerjiyi elde etmesinin yolu, bir nötron soğurmaktan geçer. Yaklaşan bir nötron çekirdek içerisine "çekilirse", yaklaşık 5 MeV'lik bir bağlanma enerjisi serbest kalır ve bu oluşan enerji uranyum–236 çekirdeğinin uyarılmasına gider. Bu uyarılmış çekirdeğin tünel oluşturmasına gerek yoktur. Neredeyse hiç beklemeksizin parçalarına ayrılabilir ve böyle yaptığında da Şekil 22'deki grafikte sağdan sol aşağıya doğru bir sıçrama olur. Daha düşük kütle parçalarına doğru olan bu sıçrama 200 MeV'den daha fazla bir enerjiyi açığa çıkartır.

Eğer bir zincirleme tepkimeyi doğurmasaydı, aslına bakarsanız insanlar açısından 200 MeV pek de öyle yüksek bir enerji değeri sayılmazdı. Fisyon süreci gerçekleşirken iki büyük fisyon parçasının yanı sıra, ayrıca iki veya üç nötron da dışarıya salınır. Bu nötronlar başka uranyum–235 çekirdekleri bularak, ek fisyon olaylarına sebep olabilirler. Bu zincirleme reaksiyon süreci bir reaktör aracılığıyla dikkatle kontrol edildiğinde, çevrim halindeki suyun üretilen enerjiyi iletmesi yoluyla elektrik üretimi gerçekleştirilebilir. Zincirleme reaksiyon süreci kontrolsüz olursa, fisyon olaylarının sayısı üssel olarak artar ve nükleer patlama gerçekleşir.

---

39 Bu yarı-ömür, tek bozunum yolu kendiliğinden fisyon olursa geçerlidir. Daha hâkim biçim alfa bozunumu olduğu için onun gerçekleşmesi daha muhtemeldir, bu yüzden yarı ömrü de "yalnızca" 700 milyon yıldır. Olasılık yasaları sayesinde U-235'te kendiliğinden fisyon olaylarının gözlemlenmesi dakikalar, saatler ve günler içerisinde mümkün oluyor.

Nükleer reaktör ve bombaların üretiminde neden uranyum-235'in kullanıldığı, neden uranyum-238'in kullanılmadığına dair de birkaç söz edelim. 146 nötronuyla U–238 çekirdeği, 143 nötronu olan U–235 çekirdeğinden çok az daha büyüktür. Dolayısıyla U-238'de yer alan 92 proton, U-235'deki 92 protonla karşılaştırılınca, birbirlerinden ortalama olarak biraz daha uzaktırlar. Bu U-238'deki proton itki etkisinin U-235'ten biraz daha düşük olması sonucunu doğurur. Daha ağır izotop bu yüzden biraz daha kararlıdır ve U–235 çekirdeğinin "kendini tutamamasına" yol açan (enerji bariyerini aşmasını sağlayan) 5 MeV, aynısını U-238'de yapmak için yeterli değildir.[40] Bu farkın açıklaması, fisyon süreci genel kuramı içerisinde, Niels Bohr ve John Wheeler tarafından fisyonun keşfinden sadece dokuz ay sonrası olan 1 Eylül 1939'da yayımlandı ve Nazi Almanya'sının Polonya'yı işgal ettiği ve II. Dünya Savaşı'nı başlattığı güne denk geldi.

Dünyada bulunan doğal uranyumun yüzde 0,7'si -yaklaşık 140 atomdan biri-, U–235 izotopudur. Bu uranyum cevherinde zincirleme tepkimeye izin verecek ölçüde bir bolluk değildir.[41] Ancak bu her zaman böyle olduğu anlamına gelmez. Uranyum–238 yaklaşık 4,5 milyar yıllık bir yarı ömürle bozunmaktadır. Daha hafif kardeşi U–235 daha hızlı bir oranda bozunuma uğrar, onun yarı ömrü 700 milyon yıldır. İki milyar yıl önce, yeryüzündeki bir uranyum birikintisinde yaklaşık olarak 27 atomun biri (yüzde 3,7) U-235'di. Bu doğada bir zincirleme reaksiyonu gerçekleştirmek için yeterli olabilirdi. 1972 yılında bir Fransız fizikçisi, Francis Perrin, bugün Gabon'daki Oklo

40 Daha küçük ikinci bir etki de burada rol oynar. "Tek-çift" etkisi yüzünden (nihayetinde dışarlama ilkesinin bir sonucudur), U–235 tarafından soğurulan bir nötron, U–238 tarafından soğurulana göre daha büyük bir bağlanma enerjisi sunar ve bu çekirdeğin enerji bariyerini aşmasında yardımcı olur.

41 1942'de Enrico Fermi yüzde 0,7'lik U–235 içeriğiyle doğal uranyumdan bir zincirleme reaksiyon çıkarmayı başardı. Ancak bu saf grafikte yayınlanarak dikkatle inşa edilmiş bir uranyum yığınağını, bir diğer deyişle "doğada" hiç olmayacak bir düzenlemeyi gerektirdi. Modern nükleer güç ve araştırma reaktörlerindeki zenginleştirmeler yaklaşık yüzde 2 ile yüzde 20 arasında değişmektedir.

kentinin kurulu olduğu bölgede yaklaşık 2 milyar yıl önce bir uranyum filizi kaynağında böylesi bir zincirleme reaksiyonun gerçekleştiğine ve bu "doğal reaktörün" fisyon enerjisi seri üretimini yüz bin yıldan daha fazla bir süre boyunca sürdürmüş olduğuna dair kanıtlar buldu.

38. Nükleer birleşme (füzyon) nasıl gerçekleşiyor?

Hem termonükleer silahlar ve hem de gelecekteki potansiyel füzyon reaktörleri açısından pratik önem taşıyan nükleer füzyon konusuna vereceğimiz bir örnekle başlayalım. Bir döteron ve bir triton bir araya gelerek bir alfa parçacığı ve bir nötron oluştururlar.

$$d + t \rightarrow \alpha + n$$

Atom numarası, nötron sayısı ve kütle numarasını açıklayan bir gösterimle bu birleşme tepkimesi (füzyon reaksiyonu) şöyle yazılabilir:

$$_1H_1^2 + {}_1H_2^3 \rightarrow {}_2He_2^4 + {}_0n_1^1$$

Tepkimeye uğrayan hidrojen çekirdeklerindeki iki proton, alfa parçacığında karşımıza çıkıyor. Hidrojen çekirdeklerindeki üç nötrondan ikisi alfa parçacığında (helyum çekirdeğinde), birisi de serbest halde bulunuyor. Alfa parçacığının büyük bağlanma enerjisi, parçacıkların Şekil 22'deki grafiğin sol tarafında tepe aşağı yuvarlanmasını sağlıyor. Bu tepkimede serbest kalan enerji 17 MeV'den daha fazla ve bu enerjinin çoğu da (14 MeV) son etapta ortaya çıkan nötronun hareket enerjisi olarak karşımıza çıkıyor.

Güneş'teki füzyon yakıtı, esasen hidrojenin en hafif izotopunun çekirdekleri olan protonlardır. Bir dizi tepkime sonrasında Güneş'in çekirdeğindeki protonlar birleşerek alfa parçacıkları oluştururlar, bu süreç şu net tepkimeyle işler:

$$4p + 2e \rightarrow \alpha + 2\nu$$

Tekrar Şekil 22'nin sol tarafına bakarsak, bunun enerji açığa çıkaran tepe aşağı (hidrojenden helyuma) bir tepkime olduğunu görürüz. Yük ve lepton numarasını (daha sonra Soru 45 ve 55'de ele alacağız) korumak için bu net tepkimede iki elektronun tüketilmesi ve iki nötrinonun (Soru 35'deki bir dipnotta belirtildiği üzere, artık dünyadaki varlığı tespit edilmiş olan nötrinolar) üretilmesi gerekir. Atom numarası, nötron sayısı ve kütle numarasını veren gösterimle Güneş'in net füzyon reaksiyonu şudur:

$$4_1H_0^1 + 2_{-1}e_0^0 \rightarrow {}_2He_2^4 + 2_0\nu_0^0$$

Bu tepkime denklemine dikkatle bakarsanız, proton ve nötron sayılarının öncesi ve sonrasında farklı olduğunu görürsünüz. Sonuç olarak iki proton iki nötronla değişmiştir. Net tepkime, beta bozunumuna neden olan etkileşimin aynısını; zayıf etkileşimi içerir. Zayıf etkileşimin Güneş'in füzyon reaksiyonlarına katılması, bir açıdan iyi bir şeydir. Bu Güneş'in neden 5 milyar yıldır parladığının ve 5 milyar yıl daha parlayacak olmasının açıklanmasında fayda sağlar. Güneş her bir saniyede 4,6 milyon ton kütleyi enerjiye çevirmektedir.

Fisyon hakkında sorduğumuz sorunun yanıtını füzyon için de vermeliyiz. Eğer enerji açığa çıkartıyorsa, bu niçin hemen ve acilen gerçekleşmemektedir? Neden protonlar füzyona uğramadan ve fazladan kütle olarak orada bulunan enerjiyi serbest bırakmadan önce, Güneş'in orta yerinde milyarlarca yıl boyunca öğütülmektedirler? Bu kaydırağın üst tarafına tırmanmış bir çocuğun önce orada saatlerce hareket etmeden oturmasına, ardından birdenbire kaymaya başlamasına benzetilebilir. Protonlar (aslında tüm çekirdekler) için miskinlik, kaynağını protonlar (ya da çekirdekler) arasındaki elektrik itkiden almaktadır. Hızlandırıcılarda bir proton bir diğerine yeterli enerji ile fırlatıldığında, iki proton hızlıca birleşmektedir. Ancak protonlar, Güneş'in merkezindeki milyonlarca derece sıcaklıkta bile öyle yavaş bir biçimde hareket etmektedirler ki, bir nükleer tepkimeyi başlatmak için birbirlerine yeterince yaklaşmaktansa başka yönlere gitmeye çok daha fazla eğilim

göstermektedirler. Enerji açığa çıkarmak üzere birleşip kaynaşmalarının sadece iki yolu vardır: Birincisi, ortalamadan çok daha fazla hareket enerjisine sahip olan rasgele bir protonun aralarındaki itkiye karşın başka bir protona çarpması. İkinci yol da tünel faaliyeti. Kimi yönlerden alfa bozunumunda olanların zıttı özelliğine sahip bir sürecin sonucunda bir proton, elektrik itki tarafından yaratılan enerji bariyerinin içerisinden tünel yoluyla geçebilir. Güneş'teki füzyon süreci bu iki yolun ikisiyle de gerçekleşir, her iki yol da şansımıza yavaş, yavaş, yavaştır. Kaydırağın tepesindeki çocuk analojimize dönersek, çocuğun kaymaya başlamasından önce bir tümseğin aşılması gerekir diyebiliriz. Yeterli ölçüde hafif hafif oynatırsa kendisini, eninde sonunda tümsek aşılacak, çocuk kaymaya başlayacaktır. Ya da çocuk kuantum mekanik biçimde döner ve küçük bir olasılıkla tümseğin içinden geçerek aşağıya doğru eğimli kaydırağa ulaşır.

Güneş'teki füzyon reaksiyonlarına *termonükleer* adı verilir, çünkü yüksek sıcaklık sayesinde mümkün olan, çekirdekleri hareket enerjisini yükseltme yönünde etkiyen ve bu yolla etkileşimlerini daha olası kılan nükleer tepkimelerdir. Dünyada da (hızlandırıcılardaki yalıtık durumlar haricinde) füzyon, yüksek sıcaklığın bir sonucu olarak gerçekleşir. Bir termonükleer silahta, yaygın adıyla H-bombasında kullanılan fisyon bombası, füzyon reaksiyonlarını tetiklemeye yetecek ölçüde büyüklükte bir sıcaklığa ulaşmak içindir; bu füzyon reaksiyonlarına bir kez ulaşıldı mı, tepkime kendi kendisini devam ettirmeye yeter.[42] Günümüzde patlayıcı olmayan, kontrol edilebilir nitelikte termonükleer reaksiyonlara ulaşmak için kapsamlı araştırma programları yürütülmektedir. Bu çalışmalar gelecekte füzyon reaktörlerine kavuşmamızı sağlayabilir.

42 Bu reaksiyonlara d-t reaksiyonu adı verilen sorunun başında açıkladığımız reaksiyon biçimi dâhildir.

VII. Bölüm

Parçacıklar

5. ve 6. bölümlerdeki sorularla boyut ölçeğini atomlardan atom çekirdeklerine doğru indirmiş olduk. Bu ve izleyen bölümde ölçeği parçacıklara doğru indirmeye devam edeceğiz. İsim ve özellikleri akıl karıştıran bir karmaşıklıkta karşımıza çıksa da parçacıklar, kuantum dünyasının kavranması için ideal bir araç özelliği taşımaktadır. Bunun nedeni birinci olarak, her şeyin temelinde bulunan madde ve enerjinin -en azından bugüne dek bilinen- en uç ve özlü parçaları olmaları; ikinci olarak da hareket ve özelliklerinin bize kuantum fiziğini yöneten ilkeleri açık bir biçimde sergileme fırsatını tanımasıdır. Bu yüzden parçacıkları şimdi işleyecek, daha sonra diğer bölümlerde kuantum ilkelerine döneceğiz.

39. Lepton nedir? Nitelikleri nelerdir?

Tablo A.1'de gösterildiği üzere altı çeşit lepton vardır: üçü yüklü (elektron, müon ve tau) ve diğer üçü ise yüksüzdür (yüklü olan üç leptona sırasıyla "ait olan" nötrinolar). 1897'de

Thomson'ın elektronları keşfinden 2000 yılında Illinois'deki Fermilab'de bir grubun tau nötrinosunu keşfine dek bir yüzyıldan fazla bir süre geçti. Aşağıdaki tarihlerin de gösterdiği gibi ilk leptondan sonuncusuna kadar olan yürüyüş oldukça zorlu geçti.

1897	J.J. Thomson elektronu keşfetti.
1930	Wolfgang Pauli nötrinonun varlığını öne sürdü.
1934	Enrico Fermi'nin beta bozunumu kuramı nötrinoyu inanılır kıldı.
1937	Kozmik ışın deneyleri orta kütleli parçacıkların (mezonlar) varlığını gösterdi.
1947	Cecil Powell mü mezonu (sonraki adı *müon*) ile pi mezonu (sonraki adı *pion*) arasındaki ayrımı ortaya koydu.
1956	Frederick Reines ve Clyde Cowan Jr. elektron nötrinosunu tanımladılar.
1962	Brookhaven Lab'den bir fizikçi grubu müon nötrinosunu keşfetti.
1978	Martin Perl tauyu keşfetti.
2000	Fermilab grubu tau nötrinosunu keşfetti.

1930'lardaki üç tarih alandaki kritik gelişmelere işaret etmektedir. Diğer altı tarih altı leptonun keşif tarihleridir.

Thomson'ın keşfinden 30 yıl sonra 1927 yılında fizikçiler sadece üç temel parçacıktan haberdardılar: elektron, proton ve foton. Her ne kadar bu tarihte Einstein'ın ışık zerresinin (foton) gerçekliği kabul görmüş olsa da, fizikçilerin çoğu onu halen elektron gibi "gerçek" bir parçacık olarak görmüyordu. Statüsündeki bu yükselişin gerektirdiği kuramsal altyapı için, 1920'lerin sonu ve 1930'ların başında ışıkla etkileşen yüklü parçacıkların kuantum kuramında (kuantum elektrodinamikte) bir ilerleme sağlanması gerekecekti. Bu kuram, fotonun da temel bir parçacık olarak adlandırılmaya elektron kadar hak sahibi olduğunu ikna edici bir biçimde gösterdi. Aynı proton gibi, onun da bitimli bir boyuta sahip olduğunu veya başka,

daha temel parçacıklarından oluşmuş olduğunu kimse henüz bilinmiyordu.

Günümüze dek uzanan parçacıklardaki bu çoğalma süreci, 1930'larda nötron, pozitron (karşı-elektron) ve mezonların (elektron ile proton arasında yer alan orta kütleli parçacıklar) keşfedilmesiyle başladı. 1940'ların sonunda gerçekleştirilen bir öncü çalışmanın gösterdiği gibi, dünyaya kozmik ışınım yoluyla bir dizi parçacık yağmaktaydı, bunların bazıları orta kütleliyken (mezonlar), bazıları da protonlardan bile ağırdı.[43] Dahası parçacıklar iki çeşitti; bazıları çekirdeklerle yeğin bir biçimde etkileşmekte, diğerleriyse yeğin bir etkileşime girmemekteydiler. Cecil Powell ve İngiltere Bristol'daki ekibi zayıf etkileşimde olanları tespit etmeyi başardılar. Parçacıkların izlerini duyarlı fotografik çözeltilerde tespit ettiler, bu yolla daha ağır bir mezonun, pi mezonunun (pion) daha hafif bir mezona, mü mezonuna (müon) doğru bozunduğunu, ardından bu mezonun da bir elektrona bozunduğunu gördüler. Pion ve müon, kütle yönünden çok farklı olmasalar da, iki parçacığın birbirinden farkı kadar farklıdırlar. Pion kuvvetli etkileşime girer, müon girmez. Pionun spini sıfırdır, müonun spini 1/2 'dir. Pionun hem yüklü hem yüksüz çeşitleri vardır, müon sadece yüksüzdür. Ve hepsinden önemlisi pion bir kuark ve bir karşı kuarktan oluşan bileşik (kompozit) bir yapıdadır, müon temel bir parçacıktır.

Keşfinin ardından uzun bir süre geçmeksizin fizikçiler müonun bir "ağır elektron" olduğunu anladılar. Müon, elektronun kütle hariç tüm özelliklerini taşıyordu. (Üstelik *çok daha* masiftir (kütlelidir), elektrondan 207 kat daha ağırdır.) Yine de bir protondan yedi kat daha az masif olmasıyla müon, elektronla beraber aynı "hafif sıklet" kategorisine girer. Bu ikisi, henüz varsayımsal olan nötrinoları ile birlikte, Yunanca "küçük" veya

43 Dış uzaydan Dünya'ya doğru yaşanan "ilk" kozmik ışınım olayı, görece basit bir mahiyet taşır. Ezici bir proton bileşiminin yanında, birkaç daha ağır çekirdek ve biraz da elektrondan oluşur. Kalan parçacıkların çoğu ise atmosferin üst kısımlarında oluşmaktadır, bunlardan bazıları yeryüzüne erişerek dünyamızdaki laboratuarlarda incelenirler.

Martin Perl (doğum yılı1927). Bu fotoğrafın çekildiği 1970'lerin başında Perl sadece ona Nobel Ödülü kazandıracak çalışmasını yürütmekle kalmıyor, aynı zamanda Amerikan Fizik Topluluğu'nu bilimsel ve toplumsal konularda kapsama alanını genişletmesi yönünde teşvik ediyordu. Topluluk bünyesindeki Fizik ve Toplum Forumu'nun kurucusu ve yayınının ilk editörüydü. Seksenli yaşlarında da Perl fizik alanında aktif araştırmalarını sürdürmektedir.

"hafif" kelimesinden türetilen lepton adıyla aynı grupta sınıflandırıldılar. Kimse müon gibi bir parçacığın var olması gerektiğini öngörmüş değildi. Tam bir sürpriz olmuştu bu. Columbia Üniversitesi'nden başarılı fizikçi I. I. Rabi'nin "Bunu kim sipariş etti?" dediği aktarılır. Kuantum elektrodinamiği üzerine çalışmasıyla Nobel Ödülüne aday gösterilmiş olan Richard Feynman'ın o dönemde Caltech'teki tahtasına şu rahatsız edici soruyu yazdığı rivayet edilir: "Müon neden ağırlığa sahiptir [diğer deyişle neden bu kadar kütleye sahiptir] ?" Aslında şu ana dek kimse Feynman'ın sorusunu cevaplayabilmiş de değil.

Daha kötü olan, müonun "ağır elektronların" sonuncusu olmamasıydı. Stanford Üniversitesi'nden Martin Perl 1960'ların sonunda daha ağır yüklü bir lepton arayışına çıktığında da başaracağına düşük bir ihtimal tanınıyordu. Ancak (bugün SLAC Ulusal Hızlandırıcı Laboratuarı adı verilen) Stanford Doğrusal Hızlandırıcı Merkezi'nde on yıl süren zahmetli bir çalışmanın ardından bunu başardı. Bu incelikli deneylerin detayına burada girmeyeceğim. Esas itibarıyla elektron ve pozitronların çarpıştırılmasıyla tau/karşı-tau çiftlerinin oluşturulmasını içermekteydi. Bir elektron ve bir pozitronun toplam kütle enerjisi yaklaşık olarak 1 MeV'dir. SLAC'deki bu çarpıştırmalarda çarpıştırılan parçacıkların toplam hareket enerjisi 5 GeV idi, kütle enerjisinden beş bin kat daha fazlay-

dı. Bu hareket enerjisi, yeni parçacıkların kütle enerjisine dönüştürülmeye uygundu. Tablo A.1'in gösterdiği gibi, bir tau ve onun eşit derecede masif karşı parçacığını yaratmak için 3,5 GeV'den fazlası gerekmektedir. SLAC'ye göre daha az güçlü bir hızlandırıcı bu işi yerine getiremezdi.

Elektron, müon ve tau; leptonun üç *çeşni*si olarak adlandırılırlar. Kütleleri oldukça farklı olmasına karşın, her üçünün spini de 1/2 dir ve her üçü de zayıf etkileşime girerler. Günümüzde her üçü de temel parçacıktır (daha küçük varlıklardan oluşmamaktadırlar) ve her üçü de fiziksel uzama sahip değildir (noktasal parçacıklardır). Çeşni yerine *nesil* kavramı da kullanılmaktadır; bu kavram betimleyicilik açısından kuarkların üç nesli ile bir bağ kurduğu için daha uygun görülebilir.

Fizikçilerin şu an bilinen üç nesil dışında başka bir nesil olamayacağına ilişkin öngörüsünü tartışmayı şimdilik 42. Soru'ya bırakıyoruz. Sadece iki lepton nesli biliniyor olsaydı (elektron ve müon), kimse bir üçüncü neslin olup olmayacağı veya sonsuz sayıda başka nesil olup olmayacağını bilemezdi. Bugün ise elimizde, sadece üç nesil olduğuna dair dikkat çekici bir gerekçelendirme var.

40. Kaç farklı nötrino var? Nereden biliyoruz?

Müonun varlığı tespit edildiğinde fizikçiler ona eşlik eden bir nötrinonun var olması gerektiğini biliyorlardı. Birçok parçacık gibi müon da radyoaktiftir. 2 mikro saniyelik (parçacık dünyasında hiç de fena olmayan uzunlukta bir süre) bir ortalama ömür içerisinde bir elektron, bir nötrino ve bir karşı nötrinoya bozunur; tepkimeyi şöyle ifade edebiliriz:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

Negatif müon (sembolü μ^-) bozunuma uğrar ve bir negatif elektron (e^-), bir karşı nötrino (sembolü $\bar{\nu}$) ve bir nötrinoya (sembolü ν) dönüşür. Nötrino sembollerine altsimgeler ekleyerek birinin elektron tipinde, diğerinin müon tipinde olduğunu göstermek istedim. Müonlar üzerine çalışılmaya başlanan 1940'ların sonu itibariyle henüz ikiyi bırakın, bir çeşit nötrino

olduğuna dair bile yeterli kanıt sözkonusu değildi. Frederick Reines ve Clyde Cowan, Jr. 1956 yılındaki çığır açıcı deneylerinde elektron nötrinosunun gerçekliğini tespit ettiler. Bunun için zengin bir nötrino (aslında karşı nötrino) kaynağı olarak, güçlü bir nükleer reaktörün kullanımına gereksinim duydular.

Bir reaktörün nasıl bir karşı nötrino seli üretebildiğini bir örnek üzerinden anlatmama izin veriniz. U–235 çekirdeği bir nötrino soğurduğu zaman, fazladan uyarıma sahip bir U–236 çekirdeği haline gelir. Bu U–236 çekirdeği "kendini tutamaz" hale geldiğinde olası birçok sonuçtan biri; bir baryum çekirdeği, $_{56}Ba_{86}^{142}$ (elli altı proton ve seksen altı nötron), bir kripton çekirdeği, $_{36}Kr_{55}^{91}$ (otuz altı proton ve elli beş nötron) ve zincirleme tepkimenin sürdürülmesini sağlayan üç serbest nötron olur. Bu nükleer bölünmenin ürünleri "nötron zengini"dir, periyodik tablonun bu kesitindeki kararlı çekirdeklere göre daha fazla nötron içermektedirler. Baryum çekirdeği beta bozunumuna uğrar, kendisini lantan çekirdeğine (atom numarası 57) dönüştürür, o da beta bozunumuna uğrar ve kendisini kararlı seryum çekirdeğine, $_{58}Ce_{84}^{142}$ dönüştürür. Bu iki radyoaktif adımdan sonra, protonların sayısı iki artmıştır, nötronların sayısı iki azalmıştır ve iki karşı nötrino açığa çıkmıştır. Bu örnekteki diğer nükleer bölünme ürünü olan Kr–91 birbirini izleyen dört beta bozunumunu tetikler ve nihayetinde kararlı bir zirkonyum çekirdeğine, $_{40}Zr_{51}^{91}$ ulaşır. Dört ayrı karşı nötrino daha açığa çıkmıştır. Toplamda tekil bir uranyum çekirdeğinin bölünmesi, reaktörden atılmaya istekli ve kararlı altı karşı nötrinonun yaratılması ile sonuçlanmıştır.

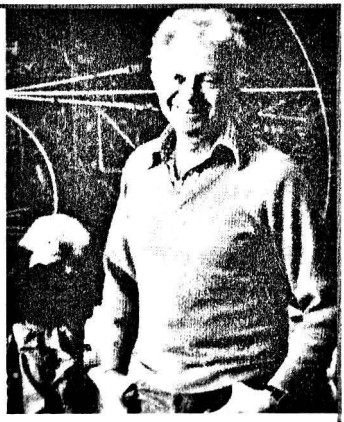
Sadece bir tanesi saptanacak olsa bile bu kadar çok sayıda karşı nötrinoya neden gerek duyulduğu sorusu halen yanıtlanmış değil. Bu durum nötrinoların "tümünün zayıf" olmasından kaynaklanıyor. Parçacık dünyasında (hatta tüm dünyada) var olan dört etkileşim çeşidi – yeğin, elektromanyetik, zayıf ve kütleçekim – oldukça farklı özelliklere sahiptir. Bazı parçacıklar, örneğin proton, bu etkileşimlerin dördünü de yaşar. Dolayısıyla proton çok sayıda başka parçacık ile çok hızlı bir biçimde etkileşime girer (parçacıklar arasındaki elektrik itki kısıtlamasından bağımsız olarak böyledir bu). Öte yandan e-

lektron, müon ve tau –yüklü leptonlar– yeğin etkileşimden bağışıktırlar. Diğer üçünü hissederler. Dolayısıyla atomdaki bir elektron, atom çekirdeğinin elektrik yükünden etkilenir, ancak çekirdekteki herhangi bir yeğin kuvvetten etkilenmez. Yüklü bir lepton hızlandırıcıda başka bir parçacıkla çarpıştırıldığında, öncelikle elektromanyetik etkileşim devreye girer. Etkili bir etkileşim için halen tek başına kâfi gelir. Örneğin Stanford Doğrusal Hızlandırıcısı'nda elektronlar pozitronlarla çarpıştırılır, böylelikle çok sayıda başka parçacık ortaya çıkar.

Yukarıda bahsettiğimiz parçacıklardan farklı olarak nötrinolar, sadece zayıf kuvveti ve daha da zayıf olan kütleçekim kuvvetini hissederler. Dolayısıyla nötrinolar başka parçacıklarla nadiren etkileşime geçerler. Etkileşimleri olasılık alanındadır. Düşük enerjili nötrinoların çoğu, herhangi bir etkileşim veya sapma yaşamaksızın tüm dünyaya (hatta ışık yıllarında katı maddeye) nüfuz edebilirler. Nadiren etkileşime girdiklerinde ise nispeten kısa – miller veya metreler, ya da olağanüstü küçük bir olasılıkla sadece santimetreler uzunluğunda – bir uzaklığı aşarlar. Bu durum, kusursuz bir şekilde binlerce mil gitmesi beklenen bir arabanın, satın aldığınız galeriden bir blok sonrasında bozulmasına benzetilebilir. İlk tanımlayıcı sonuçları sırasında Reines ve Cowan, aletlerinden saniye başı koşturarak geçen milyarlarcası içinden saatte yaklaşık üç nötrinoyu saptadılar.

O zamandan bu yana Güneş'ten ve yüksek enerjili hızlandırıcılar gibi başka kaynaklardan gelen nötrinolar, hatta 1987 yılında yakınımızdaki bir galaksideki bir süpernovadan (patlayan yıldızdan) gelen nötrinolar dahi saptandı.

1940'lar ve 1950'li yıllar boyunca müonlar üzerine araştırmalar devam ettikçe, fizikçilerin müon ve elektronlara "yolculuklarında eşlik eden" nötrinoların olması gerektiği yönünde hiçbir kuşkusu kalmadı. Bu nötrinoların farklı olabileceğine inanmak için kimi gerekçeler sözkonusuydu, ancak tekil bir nötrinonun hem elektron hem müon için çifte görev üstlenmediğine dair kesin kanıt yoktu. Müon nötrinosu ve elektron nötrinosunun farklı parçacıklar olduğuna dair kanıtlama 1962 yılında geldi. Sizlere Leon Lederman, Melvin Schwartz ve Jack



Leon Lederman (d. 1922), burada bir Einstein bebeği ile omuz omuza görüntülenmiş. Müon nötrinosunu keşfeden ekiple olan çalışmasının ertesinde Lederman Fermilab'ın yöneticisi olduğu gibi, okullarda ikinci kademe eğitimde fizik öğretiminin yaygınlaştırılması için yorulmaz bir işçilik sergiledi. Bugün Birleşik Devletlerde geçerlilik kazanan "önce fizik" (dokuzuncu sınıflarda fizik) hareketinin doğuşuna ve ilerlemesine katkıda bulundu.

Steinberger'in yönetimindeki takımın yaptığını yemek tarifi formunda sunabiliriz:

Fırını (Brookhaven elektron hızlandırıcısı) önceden 15 GeV enerji ile ısıtın.

Pion üretmek üzere proton demetini elektron hızlandırıcıdan hedefe doğru yönlendirin.

Pionların kısa bir mesafe boyunca hareketine izin verin ki, çoğu bozunarak müonlar ve nötrinolar haline gelsin.

Müonları ve diğer yüklü parçacıkları durduracak, ancak nötrinoların geçişine izin verecek bir engel oluşturun (44 *feet* boyunda demir ve beton yeterli olacaktır).

Nötrinoların atom çekirdekleri ile çarpışmasına izin vererek ne olacağını gözleyin.

Üç yüz saat daha çalıştırmaya devam edin. Sabırlı olun.

Nötrino-çekirdek çarpışmalarıyla geçen bu üç yüz saat içerisinde deneyciler yirmi dokuz müonun ortaya çıktığını, ancak hiçbir elektronun oluşmadığını gözlemlediler. Müon nötrinosu elektron nötrinosuyla aynı olsaydı, müon sayısı kadar elektronun ortaya çıkması gerekirdi. Oysa sadece kendisinin farklı olduğunu göz önüne seren müonlar ortaya çıktı. [44]

44 Bu keşifleri sayesinde Lederman, Schwartz ve Steinberger 1988 Nobel Fizik Ödülünü paylaştılar.

Martin Perl 1978'de tau leptonunu bulduğunda, istisnasız tüm fizikçiler taunun da kendi nötrinosuna sahip olacağını varsaydılar. Tau nötrinosunun farklılığını, Chicago yakınlarında kurulu Fermilab'den bir ekip 2000 yılında ispat etti. Yöntemleri, yaklaşık kırk yıl önce Brookhaven'da müon nötrinosunu sıkıştırmak için kullanılana benziyordu; ancak tau leptonunun büyük kütlesinden dolayı daha büyük bir enerjiye gereksinim duydular. 800 GeV ile protonların çekirdeklerle çarpıştırılması sonucu yaratılan bazı tau nötrinoları, kalın engelleri ve manyetik alanları aşarak, izleri fotografik çözeltilerde tespit edilebilen birkaç tau leptonunu oluşturdular. Kimse şaşırmadı ve herkes rahat bir nefes aldı. Nötrinoların üç çeşidi vardır, bunlar yüklü leptonların üç çeşidi ile uyumludur.

41. Nötrinoların kütlesi var mıdır? Neden "salınırlar"?

Wolfgang Pauli 1930'larda varlığını öne sürdüğünde nötrinonun (veya Pauli'nin o zamanki adlandırmasıyla nötronun) kütlesinin, elektronun kütlesiyle karşılaştırılabilir düzeyde olacağını, ancak her durumda protonun kütlesinden daha az olacağını hayal etmişti. Daha sonra nötrinonun kütlesinin sıfır olabileceğini varsayan beta bozunumu deneyleri yapıldı. Tritonun –hidrojen-3'ün çekirdeğinin bozunumunu ele alalım. Tepkime denklemi şu biçimdedir:

$$ {}_1H_2^3 \rightarrow {}_2He_1^3 + e^- + \bar{\nu}_e $$

Yaklaşık on iki yıllık bir yarı ömürle triton, bir helyum–3 çekirdeği artı bir elektron artı bir karşı nötrinoya dönüşür. Tüm kendiliğinden radyoaktif dönüşümler gibi bu da kütle yönünden tepe aşağı bir olaydır. Helyum–3 çekirdeği, elektron ve (kütlesi varsa) karşı nötrinonun kütlelerinin toplamı, tritonun kütlesinden az olmalıdır. Aksi durumda bozunum gerçekleşmezdi. Başlangıçtaki kütle ile son kütlelerin toplamı arasındaki fark, son haldeki parçacıkların uçuşmasını sağlayan hareket enerjisini verir.

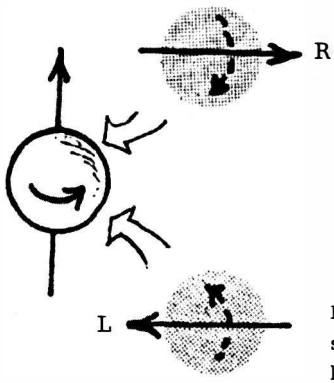
Son parçacık sayısı üç olduğu için, hareket enerjisi çeşitli biçimlerde bölüşülebilir. Örneğin elektron çok az bir hareket enerjisi ile "damlamış" ise,[45] nötrino hareket enerjisinin çoğunu yüklenerek uçar gider. Tersinden nötrino yavaşça damlamışsa, hareket enerjisinin çoğunu alan elektron olur. 1930'lardan bugüne fizikçiler atılan elektronun hareket enerjisini –özellikle de bu hareket enerjisinin en üst değerini– hep daha büyük bir kesinlikle ölçtüler. *Elektronun* hareket enerjisi en üst değerini, *nötrinonun* hareket enerjisi az olduğunda veya hiç olmadığında alır. İki çekirdeğin ve elektronun kütleleri büyük bir kesinlikle bilinebildiği için, hazır enerjinin bir bölümünün nötrinonun kütlesini oluşturmakta kullanılıp kullanılmadığını hesaplayabiliriz. Bu kütle, enerjiler dengelendiğinden bir farklılık olarak kendisini gösterecektir. Tüm deneyler, en son yapılanlar dâhil, göze görünmeyen nötrinonun kütlesi tarafından üstlenilen herhangi bir enerjiyi tespit etmeyi başaramamışlardır. Bu durum başlangıçta elektron nötrinosunun gerçekten kütlesiz olduğu fikrine yol açmıştır. Bu fikir kimseyi rahatsız da etmez, çünkü kütlesiz foton zaten herkesin alıştığı bir dostumuz olmuş durumdadır. Ayrıca gerçekten kütlesiz nötrino, bazı teorik uygulamalar için daha uygun bir olanak sunmaktadır.

İyi mi, kötü mü tartışılır, ancak bugün artık üç nötrinonun da bir miktar kütleye sahip olduğuna eminiz. Bu kütle çok küçük olduğu için triton bozunumu deneyinde tespit edilemez. Elektron nötrinosunun kütle enerjisi için bugünkü üst limit 2 eV, elektronun kütlesinden yaklaşık 250.000 kere daha küçüktür. Müon nötrino ve tau nötrinonun tekil kütleleri için üst sınırlar çok daha büyüktür (Tablo A.1), ancak gerçek kütleleri büyük ihtimalle bu sınırların çok daha altındadır. Üç nötrinonun toplam bileşik kütlesinin 0,3 eV'den daha az olduğuna dair (bu her birinin ortalama kütlesinin, elektronun kütlesinin ancak beş milyonda biri kadar olduğu anlamına gelir) kozmolojik kanıtlar sözkonusudur. Bunlar çeşitli astrofizik ölçümlerden sağlanmıştır. İnce detaylara burada girmeyeceğiz. Öyle

45 *Damlamışsa*, nötrino kütlesiz ise, doğru seçilmiş bir kelime olmaz; çünkü bu durumda çok küçük bir enerjiyle bile, ışık hızıyla uçarak uzaklaşır.

veya böyle, toplanan kanıtlar bizleri şu gerçeğe ulaştırmaktadır: Nötrinolar evrende öylesine çokturlar ki, eğer kayda değer kütleleri olsaydı, geçmişte maddenin galaksilere gelişigüzel dağılımından bugünkü dağılımına, gaz bulutlarının uzak galaksilerden ışınım soğurmalarına dek evrenin hareketine bir bütün olarak etki edebilirlerdi.

Her üçünün kütlesi için tanısal değer sunan herhangi bir ölçüm yapılamamışsa ve kütlelerine dair koyduğumuz sınırlar son derece küçükse, nasıl oluyor da nötrinoların kütlesi olduğundan bu kadar emin olabiliyoruz? İşte burada üst üste binme (*süperpozisyon*) konusuna geçiyoruz. Kuantum fiziğinin özelliklerinden biri, bir parçacık veya bir sistemin belli bir zamanda birden fazla "durumda" olabilmesidir. Buna, farklı durumlar üst üste binmiş denir. Bunu aracınızı aynı anda hem bir otobanda doğuya, hem de başka bir otobanda kuzeye doğru sürebilmenize benzetebiliriz. Aslına bakarsanız kuantum üst üste binme bundan biraz daha karmaşıktır. Örnekten ilerlersek kafanız gayet iyi, rüyada gibisiniz, tek bildiğiniz genel olarak kuzeydoğuya gitmek istediğiniz, ama yola kuzeyden mi, doğudan mı başladınız bilmiyorsunuz, bu durum radarına takıldığınız trafik polisi sizi durdurup kuzey yolunda neden hız yaptığınızı soruncaya kadar sürüyor. İyice mi karmaşıklaştı durum? En iyisi kuantum dünyasından basit bir örnekle üst üste binme konusuna devam edelim. Yukarı yönlü spine sahip bir elektron soğurulmuş. Yukarı-spin durumunda. Ama



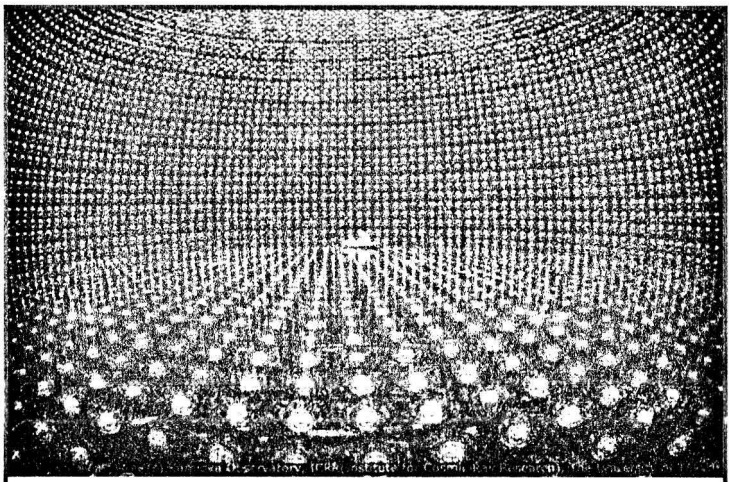
Resim 23: Yukarı-spinli bir elektron spin-sol ve spin-sağ durumlarının eşit karışımıdır.

bu yukarı-spin durumu, spin-sol ve spin-sağ durumlarının üst üste binmesidir (Şekil 23). Daha sonrasında elektronun spininin sola doğru mu, sağa doğru mu olduğunu tespit etmek için bir ölçüm yaparsanız, hakikaten sol veya sağ yönde *olduğunu* (klasik düşünüş içerisinden bir şaşkınlıkla) görürsünüz. Bu tip ölçümlerin yarısı spin-sol, yarısı da spin-sağ durum sonucunu verecektir.

Şimdi nötrinolara gelelim. Kesin çeşni-durumunda olan bir nötrino – kesinlikle elektron, müon veya tau durumlarından birinde olan bir nötrino – üç farklı kütle durumunun karışımıdır. Elektron nötrinosunun kesin bir kütlesi yoktur; farklı (*çok az* farklı) kütlelerin üst üste binmiş bir karışımıdır. [46] Laboratuarda veya Güneş içerisinde oluşan bir nötrino gerçekte kesin çeşni durumunda oluşmuştur, dolayısıyla kütle durumlarının bir karışımıdır. Örneğin Güneş, sadece elektron nötrinoları yayar. Bir pion bir müona bozunduğunda sadece müon nötrinoları yayar. Ayrıca nötrinoların tespitinde kullanılan bazı biçimlerde kesin çeşni süreçleri de kullanılmaktadır. Ray Davis, örneğin, Güney Dakota'daki Homestake madeninin derinliklerinde gerçekleştirdiği öncü çalışmasında Güneş'e ait nötrinoları, beta bozunumu sürecinin tam tersi olan bir yolla harekete geçirerek tespit etmeyi başardı. Bu onun sadece elektron nötrinolarını saptayabilmesi anlamına gelmekteydi.

Şimdi gerekçelendirmemizin son halkasına yaklaşıyoruz. Belirli bir kütle durumunun belirli bir enerjisi ve bu yüzden belirli bir titreşim frekansı vardır (Bu durum sadece fotonlarda değil, tüm sistemlerde geçerli olan Planck-Einstein formülü $E=hf$ ile uyumludur). Normalde maddi sistemlerde bu frekans, etkisi ölçülemeyecek derecede hızlıdır. Ancak müzikteki vuruş notalarına çok benzeyen bir olgu olarak bu etki, iki veya üç farklı kütle durumu karışmışsa ölçülebilir hale gelir. Müzikte birbirinden çok az farklı frekanstan iki nota çalındığında, bir "vuruş notası" elde edilir. Kulağımız iki özgün frekansın farkı olan bir frekansa sahip bir tınıyı duyar. Bu yüzden bir

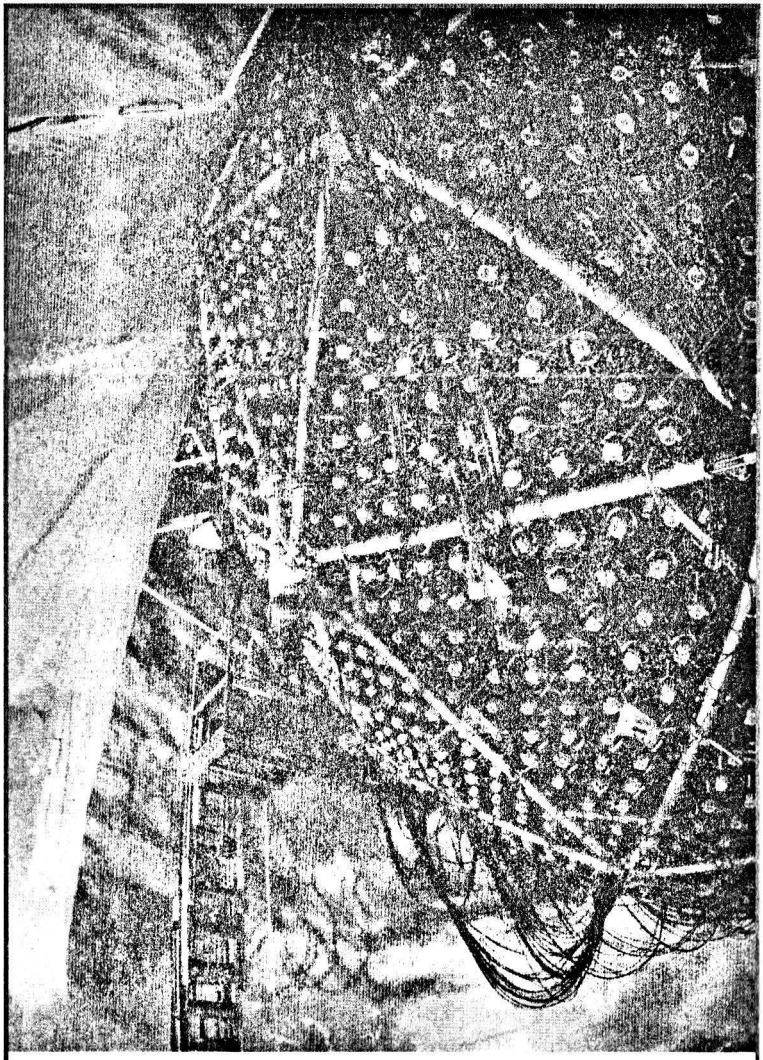
46 Bunun aksine, tahmin edebileceğiniz gibi, kesin kütleli bir nötrino, eğer meydana getirebilmiş olsak, üç farklı çeşnili nötrinonun üst üste binmesi olurdu.



Kısmen saf su ile doldurulmuş on bir binden fazla foton dedektörüyle Süper Kamiokande dedektörü.

kemanın yayı 440 Hz, diğer kemanın yayı 442 Hz titreşirse, siz bir dinleyici olarak sadece 2 Hz titreşimli bir yoğunluk duyarsınız. Nötrinolarda da böyledir. Örneğin Güneş'te üretilmiş bir elektron nötrinosu, üç farklı frekansta titreşen üç farklı kütle durumunun üst üste düşmesidir. Bu frekanslar "vuruşarak", bir elektron nötrinosunun periyodik olarak bir müon nötrinosuna, bir tau nötrinosuna ve tekrar bir elektron nötrinosuna dönüşmesiyle ortaya çıkan bir titreşim üretirler. Bu nötrino titreşimine *nötrino salınımı* denir. Nötrino salınımının ölçülebilmesi, nötrinoların kütleye sahip olduklarının ve üç kütle durumunun eşit olmadığının bariz kanıtı olarak kabul görmektedir. Nötrinolar gerçekten kütlesiz olsalardı veya tüm nötrinolar aynı kütleye sahip olsaydı, salınım gerçekleşmezdi.

Ray Davis'in Güneş'ten beklediğinin yaklaşık sadece üçte biri kadar elektron nötrinosu bulmuş olması, nötrinoların salındığını kanıtlamadı ancak bunu tahmin etmesini sağladı. (Başlangıçta kimse bu azlığı açıklayamadı. Astrofizikçi John Bahcall'ın bu durumu "Ray Davis biraz daha az nötrino bulmuş olsaydı, Güneş'in ışımadığını kanıtlamış olacaktı" diyerek



Yerin bir milden fazla altında, iç kısmında 1100 ton ağır su içeren bu SNO topu üzerinde on bin foto dedektör var.

vurguladığı bilinir.) Nötrino salınımı için ilk güçlü kanıt 1998 yılında Japonya'daki yeraltı dedektörü Süper Kamiokande'den geldi. Buradaki araştırmacılar, kendileri de atmosferin üst kısmında kozmik-ışınların çarpışması sonucu oluşmuş müon nötrinoları tarafından oluşturulmuş müonları ölçümlediler. Dünya nötrinolara karşı hiçbir engel oluşturmadığı için, Kamiokande dedektörü hem alttan hem üstten, her yönden nötrinoların sağanağına uğramalıydı. Bunun yerine araştırmacıların bulduğu, dedektöre dünyanın uzak bölgelerinden yakın bölgelerine oranla daha az sayıda müon nötrinosunun ulaştığı gerçeği oldu. 8000 mil yolculuk edenlerin sayısı, sadece birkaç yüz mil yoldan gelenlere göre daha fazla azalmaktaydı. Bu durum, uzun yolculuk sırasında bazı müon nötrinolarının başka bir şeye doğru salınım yaptıklarının, bu yüzden de tespit edilmekten kaçınabildiklerinin kanıtıydı.

2001 yılı ve sonrasında daha gelişmiş bir dedektör – Sudbury Ontario, Kanada'daki SNO, açılımı Sudbury Neutrino Observatory – nötrino salınımı lehine daha ikna edici kanıtlar elde etmemizi sağladı.[47] SNO'da Güneş'ten gelen nötrinolar 1 milyon kg ağır su ihtiva eden bir tankın üzerine yağdırılır. Bu çok sayıda döteron –bir proton ve bir nötrondan oluşan ağır hidrojen çekirdekleri– demektir. Güneş'ten gelen bir nötrino, döteron içerisindeki protonun bir nötron ve bir pozitrona dönüşmesine neden olursa, bu nötrinonun elektron çeşnisi olmasının tanımsal kanıtı olur. Nötrino döterondan sadece "sekerse" (ya da fizikçilerin dediği gibi saçılırsa), herhangi bir çeşniden olabilir. SNO sonuçları Güneş'ten gelen nötrinoların toplam sayısının elektron çeşnisi sayısının üç katı olduğunu ortaya çıkardı. Bu arada başka yollardan da varlığı kontrol edilmiş olan salınımın kesinlikle gerçek olduğu ispatlanmış oldu.

Salınım varsa, kütle vardır –aslında en az iki, daha çok da üç farklı kütle vardır. Fizikçiler şeylerin neden öyle olduklarını düşünmekten haz duyarlar. Nötrinoların kütlelerinin nereden

47 SNO bir nikel madeninde kuruludur. Önceki nötrino deneyleri ise Güney Afrika'daki bir altın madeninin yanı sıra Güney Dakota'daki Homestake altın madeninde gerçekleştirilmiştir. Maden sanayii nötrino fiziği için elverişli koşullar sunmaktadır.

geldiğine ilişkin en iyi tahmin, halen keşfedilmeyi bekleyen bir parçacık olan Higgs bozonudur (Soru 98).

42. Parçacıkların gerçekten sadece üç nesli mi vardır?

Önce kuarkların da -leptonlar gibi- üç nesil olarak dizildiklerini söyleyelim. Tıpkı leptonlarda her nesilde iki lepton olması gibi, kuarklarda da her nesilde iki kuark vardır.[48] Düzen ve basitliği seven fizikçiler bundan memnundurlar -her ne kadar nötrino kütlesi ve nötrino salınımı pek o kadar basit olmasa da. Ancak dördüncü bir nesil olmadığını veya ek nesil dizileri olmadığını nereden biliyoruz –ya da daha iyisi, buna neden inanıyoruz? Sonuç itibarıyla, leptonların ikinci neslini (müon ve nötrinosu) sürpriz bir biçimde karşımızda bulduk, üçüncü nesil (tau ve *onun* nötrinosu) daha da büyük bir sürpriz olmadı mı? Kuark hikâyesi de benzerdir: Proton ve nötronları açıklamak için iki kuark yeterli oluyordu ve acayip dediğimiz parçacıkları açıklamak için de bir üçüncü kuark gerekmekteydi. Bu üçünü dördüncü bir kuark izledi, böylece tılsım kuark ikinci nesli tamamladı ve en sonunda da daha ağır olan ve daha az bulunan üst ve alt kuarklar geldi, üçüncü nesil tamamlanmış oldu.

Bu yeni nesillerin davetsiz teşrifi ertesinde, fizikçilerin başka yeni nesillerin gelişini beklemesi doğal olmaz mıydı? Ormanda önce bir, sonra ikinci, daha sonrasında üçüncü bir tapınağın kalıntılarına rastlayan antropolog mantıken başka bazı tapınakların da keşfedilmeyi beklediğini düşünmez mi? Bu beklentiye birkaç şey engel oldu. Birincisi SNO deneyleri (önceki Ray Davis deneyinin bulgularıyla uyumlu olarak) Güneş'ten gelerek aletlerine çarpan nötrinoların üçte birinin elektron çeşnili olduğunu göstermekteydi. Bu toplamda üç çeşninin (veya üç neslin) varlığına işaret eder. Eğer on çeşni olsaydı, Güneş'ten Dünya'mıza olan 150 milyon kilometrelik

48 Fizikçilerin ayaklarını yerden kesmemek için olsa gerek, doğa altı kuarkın altı farklı çeşnisi olacak şekilde bir ayarlama yapmışken, leptonları karakterize etmek için üç çeşni yeterli olmuştur.

yolculuk sonrası aralarındaki salınım sonucu sadece onda birinin kalmasını beklerdik.

Üç neslin var olduğuna dair en inandırıcı kanıt, hemen göze çarpmamasına karşın oldukça ikna edicidir. Protondan neredeyse yüz kat daha fazla masif olan Z^0 dediğimiz yüksüz bir parçacık, çeşitli parçacık çiftlerine bozunur. Bu çiftlerin bazıları, bir elektron ve bir pozitron (karşı-elektron) veya bir müon ve bir karşı-müon gibi, laboratuar koşullarında gözlemlenebilirler; çünkü yüklüdürler ve dedektörde kolaylıkla etkileşim sergilerler. Diğer çiftler, örnek olarak bir elektron nötrinosu ve karşı parçacığı, dedektörde saptanmazlar; çünkü yüksüzdürler ve maddeyle çok zayıf etkileşim halindedirler. Deneyi yürütenler yüklü parçacık çiftlerine dönük olarak çeşitli bozunumların olasılıklarını ölçebilirler, dolayısıyla (nasıl olduğunu birazdan açıklayacağım) Z^0 parçacığının bozunumunun genel toplam olasılığını hesaplayabilirler. Aradaki farktan yüksüz parçacık çiftlerine dönük olarak gerçekleşen bozunum olasılığını çıkartabilirler. Kuantum fiziğinin göz kamaştırıcı özelliklerinden biri Heisenberg'in belirsizlik ilkesinde saklıdır[49] (1927 yılında yirmi beş yaşındaki Werner Heisenberg tarafından geliştirilmiştir). Bu ilkeye göre zaman ve enerji eşzamanlı olarak mutlak bir kesinlikle ölçülemez. Bir olayın zamanı ne kadar yüksek bir kesinlikle biliniyorsa, enerjisi o kadar düşük bir kesinlikle bilinebilir. Enerji ne kadar fazla kesinlikteyse, zaman o kadar az kesinliktedir. Yaşama zamanı yaklaşık olarak sadece 10^{-25} saniye olan (bu zaman içerisinde ışık bile bir atom çekirdeğinin bir tarafından diğer tarafına ulaşamaz), Z^0 parçacığı gibi kısa ömre sahip parçacıklarda bu ilkenin doğrudan geçerliliği sözkonusu olur. Parçacığın enerjisi –gerçekte kütlesi ile eşanlamlıdır– ölçülemez derecede belirsizdir; çünkü olağanüstü kısalıkta bir yaşam sürer. Fizikçiler Z^0'ın kütlesini ardı ardına ölçtüklerinde, buldukları değer ölçüm aralığı yaklaşık 2,5 GeV oynamakta, ortalama kütle ise 91 GeV çıkmaktadır. Belirsizlik ilkesini kullanarak önce yaşam süresini ve ardından yaşam süresinden yola çıkarak tüm olası ürünlere dönük gerçekleşen bozunumların toplam olasılığını hesapla-

49 *bkz.* Soru 74.

maktadırlar. Bu toplam olasılıktan yüklü-parçacık ürünlerine dönük gerçekleşen bozunumun olasılık ölçümünü çıkardığımızda, görülmeyen yüksüz parçacıklara bozunma olasılığına ulaşmış oluruz.

Z^0 verilerinin analizi bizleri, yüksüz leptonların (bir diğer deyişle nötrinoların) çeşni sayısının - yaklaşık yüzde 2'lik bir belirsizlikle - 2,92 olduğu şaşırtıcı sonucuna ulaştırmaktadır. Bu sonucu yorumlamanın sadece bir yolu vardır: Lepton çeşnileri (veya nesillerinin) sayısı 3'tür.

43. Tüm elektronların özdeş olduğunu nereden biliyoruz?

"Elektron elektrondur. Elbette hepsi aynı olacak. İki parçacık aynı olmasaydı, fizikçiler onlara aynı ismi vermezlerdi" diyebilirsiniz. Bu yeterli bir cevap değildir, çünkü sorudaki *özdeş* kelimesi her hususta aynı, *mutlak olarak* aynı anlamına gelmektedir. Bu sorumuzu derin ve önemli kılmaktadır, çünkü bizi doğada keşfedilmeyi bekleyen – varsa – ek katmanlarla ilişkilendirmektedir.

Bizi çevreleyen gündelik yaşamda birbiriyle özdeş iki şey *yoktur*. NBA ve takımlarını memnun etmek için bir basket topu üreticisi, özdeş basket topları üretmeye çalışır. Toplar fabrikadan her biri aynı çapta, aynı kütlede, aynı malzemelerden üretilmiş ve aynı basınçla şişirilmeye hazır biçimde çıkar. Ancak elbette özdeş olmaktan çok uzaktırlar. Atomik düzeyde değerlendirildiklerinde, her bir top bir diğerinden milyarlarca farklı özellikle ayrışır. Bir parçacık fizikçisinin değerlendirme açısıyla, "özdeş" basket topları bir çeşitlilik kaleydoskopudur. Aynısı "özdeş" ikizler için de geçerlidir. DNA dizilimlerinin çoğunun özdeş olduğu doğrudur, ancak ikizler pek çok biçimde birbirlerinden farklılık gösterirler.

Yine de parçacık dünyasının derinliklerine indiğimizde, gerçek özdeşliğe ulaşıyor gibiyiz. Öncelikle bir elektronu tam olarak tanımlamak için kaç niceliğin gerektiğini düşünelim: Kütlesi, yükü, spini, çeşnisi, manyetik gücü, zayıf etkileşiminin gücü. Mesele bunlarla ilgilidir. Kendi çevrenizde tanımlayabileceğiniz en basit şey tam olarak betimlenmesi için bunlardan

çok daha fazla niceliği (atomik düzeye doğru inerek) zorunlu kılar. Görünüşe göre varlıklar küçüldükçe basitleşiyor. Bu sadece, bilineni bildirmek değil. Sürgit açığa çıkarılacak katmanlar var olsaydı, elektron da dünyamız kadar ya da bir basket topu kadar karmaşık olabilirdi. Ayrıca elektronu karakterize eden bu az sayıdaki nicelik, çarpıcı – yük, kütle ve manyetik moment için milyonda bir kesinlikten daha fazla – bir kesinlikle bilinebilmektedir. Bu bir araştırmacı tarafından üzerinde çalışılan bir küme elektronun özelliklerinin, herhangi başka bir araştırmacı tarafından çalışılan bir başka küme elektronunkilerle tam olarak uyuştuğu anlamına gelmektedir.

Tüm elektronların özdeşliği için en etkili kanıt, Pauli dışarlama ilkesine uymalarıdır. Bu ilkenin genel önermesi, iki elektronun aynı anda aynı hareket durumuna sahip olamayacağıdır. Daha kesin ifadesiyle ilke şudur: Tek-tamsayı-bölü-iki spine sahip iki özdeş parçacık (iki özdeş fermiyon anlamına gelir), aynı anda aynı hareket durumunda olamazlar. İlke sadece (fermiyon oldukları koşullarda) *özdeş* parçacıklar için geçerlidir. Elektronların bu ilkeye bilinen kuraldışılıklar olmaksızın uyuyor olmaları, bize özdeş oldukları yönünde güçlü bir kanıt sunmaktadır.

Demek ki parçacık fiziğinin en derin düzeyinde, gerçekten özdeş ve görece az sayıda özellikle tam olarak tanımlanabilen varlıklarla karşılaşıyoruz. Bu durum keşif yolculuğumuzda en altta bir temelin, bir zemin katının varolduğu tahminini yapmamızı sağlıyor. Şimdi bu zeminde mi olduğumuzu, yoksa bunu sicim teorisyenlerinin üzerinde çalıştığı çok daha küçük boyutlarda mı bulacağımızı kimse söyleyemez, ancak gerçekten bir zemin var gibi gözüküyor.

VIII. Bölüm

Parçacıklara Devam

44. İsimler, isimler, isimler. Tüm bunlar ne anlama geliyor?

Parçacıklar hakkında bilgi edinirken ayak bağı olan şeylerden birisi de kullanılan adlandırmalar. Bazıları oldukça tuhaf olan kafa karıştırıcı bir isim dizilimi sözkonusu. Şimdi parçacık fizikçilerinin kullandığı bazı tabirlerin açıklamasını verelim. Bunlar referans noktası olarak yardımcı olabilir. Bazı terimler daha önceki bölümlerde karşımıza çıktı, bazıları da bu ve sonraki bölümlerde karşımıza çıkacak.

Leptonlar – Yeğin etkileşime girmeyen, 1/2 spine sahip temel parçacıklar. Altı lepton vardır: Üçü -1 elektrik yüklü (elektron, müon ve tau) ve üçü de yüksüzdür (elektron nötrino, müon nötrino ve tau nötrino).

Kuarklar – Yeğin etkileşime giren, 1/2 spine sahip temel parçacıklar. Altı kuark vardır: Yukarı, aşağı, tılsım, acayip, üst ve alt kuark. Yukarı, tılsım ve üst kuarklar +2/3 elektrik

yüküne sahiptirler. Aşağı, acayip ve alt kuarklar -1/3 elektrik yüküne sahiptirler. Kuarklar hiç yalnız biçimde gözlemlenmemiştir. İkisi veya üçü bir araya gelerek *hadronları* oluşturmak üzere birleşirler.

Kuvvet taşıyıcıları – Etkileşimlere aracılık eden 1 spinli temel parçacık. On bir kuvvet taşıyıcısı vardır: W (pozitif ve negatif yüklü) ve Z^0 (yüksüz) zayıf etkileşime aracılık ederler; foton elektromanyetik etkileşime aracılık eder; sekiz tane gluon da yeğin etkileşime aracılık eder. (Aynı zamanda teorik olarak 2 spinli graviton da kütleçekimsel etkileşime aracılık eder ancak, şu ana dek parçacık dünyasında bir rol oynamamıştır.) Kuvvet taşıyıcılarına *değişim parçacıkları* da denir.

Çeşni – Çeşitli *lepton* ve *kuarkları* sınıflandırmak için kullanılan keyfi isim. Leptonların üç çeşnisi vardır. Her bir elektrik yüklü lepton ile onunla bağlantılı nötrino bir çeşniyi oluşturur. Altı kuark da farklı çeşnilere sahiptir. (Temel *fermiyonların* farklı çeşitlerini ayırt etmek için *aile* ve *nesil* sözcükleri de kullanılır.)

Renk yükü – Her *kuarkın* kendisini dışa vurduğu farklı biçimleri sınıflandırmak için kullanılan keyfi isim. Üç renk yükü vardır, geleneksel olarak *kırmızı*, *yeşil* ve *mavi* olarak adlandırılırlar.

Hadronlar – İki veya daha fazla kuarktan oluşan bileşik parçacıklar. Kuarklardan farklı olarak laboratuarda tek başlarına gözlemlenebilirler. Yeğin etkileşime girerler.

Mezonlar – Bir *kuark* ve bir karşı kuarktan oluşan tamsayı spinli *hadronlardır*. Mezonlar *bozondurlar*.

Baryonlar – Üç *kuarktan* oluşan, tek tamsayı bölü iki spinli (örneğin 1/2 , 3/2, 5/2) *hadronlardır*. Baryonlar *fermiyondurlar*.

Pion – En az kütleli *mezon*.

Nükleon – En az kütleli *baryonlar* olan proton veya nötrona verilen isim.

Fermiyon – Tek tamsayı bölü iki spinli herhangi bir parçacık (örneğin 1/2, 3/2, 5/2). Fermiyonlar Pauli dışarlama ilkesine uyarlar.

Bozon – Tamsayı spinli herhangi bir parçacık (örneğin 0, 1, 2). Bozonlar Pauli dışarlama ilkesine uymazlar.

Karşı parçacık – Bir parçacıkla bazı özellikleriyle özdeş (örneğin kütle), başka bazı özellikleriyle (örneğin elektrik yükü) zıt olan varlık. Bir karşı parçacığın karşı parçacığı orijinal parçacıktır. Parçacıkların çoğu ayrı bir karşı parçacığa sahiptir. Az sayıda parçacıkta (en önemlisi foton olmak üzere), parçacık ve karşı parçacık özdeştir.

45. Kuarkların özellikleri nelerdir? Nasıl birleşirler?

2. Dünya Savaşı'ndan sonraki on yıllarda parçacıklar kahvehanesine takılan müdavimlerin sayısında hızlı bir artış gerçekleşti. Bunlar arasında "acayip" parçacıklar da vardı. Böyle adlandırılıyorlardı; çünkü parçacık çarpışmalarında – besbelli yeğin etkileşimlerle – hızlıca meydana geliyorlar, ancak - bozunumları zayıf etkileşimlerle yönetiliyormuşçasına – yavaş biçimde bozunuma uğruyorlardı. Acayip parçacıklardan birine örnek olarak lambda-sıfırı ele alalım; 1116 MeV'lik kütlesi onun bir proton (kütlesi 938 MeV) ve bir piona (kütlesi 140 MeV) bozunmasına elverişlidir:

$$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$$

Bu bozunumun ortalama ömrü olan $2{,}6 \times 10^{-10}$ saniye (bir saniyenin milyarda birinden azdır) ve bozunumu "yavaş" olarak nitelemek için yeterlidir. Bozunum yeğin etkileşimlerin etkisi altında ve frenlenmemiş olsaydı, yarı-ömrün milyarlarca kere daha kısa olması beklenirdi.

Acayip parçacıkların bu tuhaf yavaşlıktaki bozunumu, Murray Gell-Mann ve George Zweig'ın 1964 yılında birbirlerinden bağımsız biçimde[50] hadronların daha küçük - Gell-Mann'ın *kuarklar* adını verdiği - bileşenlerden oluşması gerektiğini dü-

50 O dönemde her ikisi de Caltech'teydi ve her ikisi de parçacık fiziğindeki benzer bulmacalar üzerine çalışıyordu; ancak kuarkların varlığı düşüncesine birbirlerinden ayrı olarak vardılar.

şünmelerine yol açan etmenlerden biriydi. Üç kuarkın varlığını öne sürdüler; *yukarı*, *aşağı* ve *acayip* kuark (*yukarı* ve *aşağının* uzaydaki yönlerle ilgisi yoktu) ve bu yeni parçacıkların, eğer varsalar, kesirli elektrik yüküne sahip olmaları gerektiğini tespit ettiler. Yukarı kuarkın elektrik yükü +2/3, aşağı kuark ve acayip kuarkın ise -1/3'tü. Onların şemasında bir baryon – proton, nötron veya lambda gibi – üç kuark içerir; bir mezonsa – örneğin pion – bir kuark ve bir karşı kuark içermektedir. Yukarı kuark için u, aşağı kuark için d, acayip kuark için s kısaltmalarını kullanarak Gell-Mann ve Zweig tarafından varsayılan (şimdi ise sağlam kanıtlanmış olan) bileşkeler lambda için uds, proton için uud ve negatif pion için $d\bar{u}$ 'dır. u'nun üzerindeki çizgi karşı kuark olduğunu belirtir. O halde lambda bozunumu için tepkime denklemi şu şekilde yazılabilir:

$$uds \rightarrow uud + d\bar{u}$$

Tablo A.2'ye baktığımızda elektrik yüklerinin doğru şekilde birleştiğini kolayca görmek mümkündür; lambda için sıfır, proton için +1 ve negatif pion için -1 (karşı kuark $\bar{u}$ 'ın elektrik yükünün kuark u'nun elektrik yükünün karşıtı, dolayısıyla -2/3 olduğunu aklımızda tutarak). Tepkime denklemi yeni bir kuralı da ortaya çıkarmaktadır: Fizikçiler parçacıkların sayısının izini sürüyorlarsa karşı parçacıkları negatif olarak saymak zorundalar. Tepkime denkleminin sol tarafında lambda parçacığını oluşturan üç kuark var. Sağ tarafta, bozunumdan sonra dört kuark ve bir karşı kuark var. Karşı kuarka negatif parçacık sayısı verilirse kuark sayısı korunmuş olur. Aynı fikri kullandığımız başka bir örnek verelim. Bir elektron ve bir pozitron çarpışarak iki foton ortaya çıkarmak üzere karşılıklı olarak yok olduklarında, çarpışma sonrası lepton sayısı açıktır ki sıfır olur, çünkü hiç lepton kalmaz. Çarpışma öncesi elektron +1, karşı parçacığı pozitron -1 olarak sayılırsa, lepton sayısı yine sıfır olur. Böylesi bir kural size gereksiz gelebilir, ancak parçacık sayısının korunduğu her durumda işler ve teorik bir temele sahiptir.

Kuark adını kendisine borçlu olduğumuz Murray Gell-Mann (d.1929). Dahi bir çocukken Gell-Mann dilbilim ve arkeolojiye ilgi duyardı, yaşamı boyunca da fiziğin yanı sıra bu alanlara dönük ilgisini devam ettirdi. Yale'den lisans derecesini on sekizinde aldı, Massachusetts Institute of Technology'den doktorasını aldığında yirmi bir yaşındaydı, otuz yaşında Caltech'te tam zamanlı profesör oldu. Sonraki yıllarda fizik araştırmalarını karmaşıklık (*complexity*) alanında yoğunlaştırdı.

Yukarıdaki tepkime denkleminde kuarkların sadece önceki ve sonraki toplam sayısına değil de belli çeşitteki kuarkların sayısına bakarsanız, ilginç bir durumla karşılaşırsınız. Yukarı kuarkların sayısı öncesinde de sonrasında da aynıdır (önce +1 ve sonra +2–1=+1), ancak aşağı kuarkların sayısı bir artar (1'den 2'ye) ve acayip kuarkların sayısı bir azalır (1'den 0'a). Bozunum sırasında bir acayip kuark bir aşağı kuarka dönüşmüş gibi görünür. Aslında bu hiç de fena bir betimleme değildir. Bozunumu frenleyen ve saniyenin milyarda birine yayan kuark tipinin değişimidir. Acayiplik "kısmen korunan" bir özelliktir. Yeğin etkileşim kuarkı değiştirmeden bırakır, ancak kuark zayıf etkileşimin elinde oldukça uysal, değiştirilmeye açıktır. (Devamı Soru 60'ta.)

Şimdiye kadar üzerinde konuşmuş olduğumuz üç kuark, şu ana dek bildiğimiz kuarkların sadece yarısı. Diğer üç kuarkın varlığının nasıl tahmin edildiği ve nasıl bulundukları hususundaki tarihi ayrıntıları atlayalım. Yıllarını belirtirsek; tılsım kuark 1974'te, alt kuark 1977'de, üst kuark 1995'te bulundu. Kuarklar hakkındaki bilgilerimiz, lepton keşifleriyle uyumlu olmasa da, bu keşiflerle paralel olarak arttı. Acayip kuarkın üst ve alt kuarklarla birleşerek üçlemesi gibi; önce müon, e-

lektron ve nötrinosu ile birleşerek üç leptonu oluşturdu. Müonun nötrinosunun lepton sayısını dörde çıkarması gibi, tılsım kuark da kuarkların sayısını dörde çıkardı. Hem leptonlar hem de kuarklar için son bir çift (leptonlarda tau ve nötrinosu, kuarklarda alt ve üst kuarklar) her ikisinin de yarım düzineye ulaşmasını sağladı ve bugün bu sayının dizinin sonu olduğunu düşünmemiz için gerekçelere sahibiz.

Daha önce vurguladığımız gibi altı kuark, altı çeşnisiyle birlikte üç nesle ayrılır; bu üç nesil üç lepton nesline denk düşer. Aşağı ve yukarı ilk nesli, acayip ve tılsım ikinci nesli, alt ve üst üçüncü nesli oluşturur. Birbirleriyle benzeşmeyen kütleleri (Tablo A.2) bu nesil hiyerarşisinin yansımasıdır. Leptonlar da benzer biçimde ikişerden üç sete ayrılırlar. Ancak leptonlarda nesil ayrımı, çeşni ayrımıyla aynıdır.

Kuarkların çeşni dışında *renk yükü* denen bir başka kuantum özelliği daha vardır. (Kuarklardaki rengin büyük ölçekli dünyamızdaki renklerle hiçbir ilişkisi olmadığını söylemeye gerek yok.) Altı kuarkın her biri *kırmızı*, *yeşil* ve *mavi* denen üç durumdan birinde olabilir. Protonlar, pionlar, nötronlar veya lambdalar gibi gözlemlenebilen varlıklar "renksizdir". *Renksiz* olmak, aslında üç renk yükünün eşit karışımına sahip olmak demektir; dolayısıyla üç kuarkın bir proton oluşturduğu her durumda, kuarklar üç farklı renk durumunda demektir. Biri kırmızı, biri yeşil ve biri de mavidir. Ek olarak karşı kuarklar, karşı kırmızı, karşı yeşil ve karşı mavi olabilirler.

Kuarkların renkli olması, onları bir arada tutan gluonların da - özgün bir biçimde - renkli olmaları demektir. Her gluonun bir renk yükü ve bir karşı renk yükü vardır, dolayısıyla kırmızı/karşı-yeşil ve mavi/karşı-kırmızı bir gluonun olası betimlemeleridir. Bir gluon bir kuark tarafından yayınlanır veya soğurulursa, kuark renk yükünü değiştirebilir, ancak bu her zaman "büyük" bileşik parçacık renksiz kalacak şekilde olur. Gluonların renk yüklenmesi sayılarıyla bağlantılıdır; her ne kadar üç renk ve üç karşı renk yüküyle dokuz olabileceği düşünülse de, bu sayı sekizdir.

Etkileşimlerinin zayıflığı ve katı maddenin içinden miller boyunca boş uzaymışçasına geçebilmeleri yüzünden, nötrino-

ların tespit edilmesinin zor olduğu söylenir. Kuarkların tespiti bu bakımdan daha da zordur. Evet, güçlü (yeğin) biçimde etkileşirler; ancak gördüğümüz parçacıklar içerisinde güvenlikli biçimde saklı kalmayı da başarırlar. Şimdiye dek laboratuarlarda hiçbir tekil kuark gözlemlenememiştir. Bunun nedenini Soru 9'da ele aldık.

46. Bileşik parçacıklar hangileridir? Sayıları nedir?

İki veya daha fazla temel parçacık bir başka parçacık oluşturmak için yakınlaşarak bir araya geliyorsa, bunun sonucuna *bileşik* parçacık diyoruz. Leptonlar kendilerini küçük bir alanda birbirlerine bağlayacak[51] bir yeğin kuvvete maruz kalmadıkları için, bileşiklerin tümü kuarklardan (karşı kuarklar dâhil) oluşmaktadır. (Daha alt katmanlar olacak mı? Günün birinde kuarkların da birer bileşik oldukları ortaya çıkacak mı? Pek öyle gözükmüyor, ancak kim bilir?)

Mezonlar kuark-karşı kuark çiftlerinden oluşmaktadırlar. Bunlardan bazıları Tablo A.4'te gösterilmiştir. Baryonlarsa üç kuarktan oluşur.[52] Tabloda bunlardan birkaçı da gösterilmektedir. Yarım düzine kadar farklı kuarkın ikili ve üçlü olarak düzenlenmesinin çok sayıda olsa da belirli sayıda mümkün olabileceği düşünülürse, bileşik parçacıkların sayısının (büyük de olsa) sınırlı sayıda olması gerektiği düşünülebilir. Doğa bu beklentiye karşı çıkmaktadır. Kuark birleşimleri aynı atomlardaki gibi, taban durumları ve uyarılmış durumlarda bulunabilir. Örneğin sadece nükleonun bir hayli fazla sayıda uyarılmış durumu sözkonusudur. Bunlar nükleona geri bozunurken

51 Leptonlardan oluşan bir bileşik parçacığa en yakın duruma, bir elektron ve bir pozitronun elektrik çekimle birbirine bağlanmasından adını alan *pozitronyum*da rastlarız. Bir hidrojen atomundan bile daha fazla yer tutan bu varlığa, anlaşılır biçimde pozitronyum *parçacığı* değil, pozitronyum *atomu* adı verilmektedir.

52 2003'ten beri çeşitli araştırmacılar bir "pentakuark"ın varlığına dair kimi kanıtlar ileri sürdüler. Ancak son aramalarda dört kuark ve bir karşı kuarktan oluşan böylesi bir maddeye rastlanmadı. Varsa da olağanüstü kısa bir yarı-ömre sahip ve saptamak son derece zor.

uyarılmış bir atomun yaptığı gibi bir foton yayarak değil, tipik olarak bir pion yayarak bozunurlar. Bu uyarılmış bileşiklerin yaşam süreleri olağanüstü kısadır. Öte yandan sayıları epey çoktur. Dolayısıyla "sayıları nedir?" sorusuna yanıt olarak, "bitimsiz sayılardadırlar".

Omega-eksi (Ω^-) ilginç bir baryondur, çünkü üç acayip kuarktan oluştuğu için "üç kat acayip"tir. Varlığı Murray Gell-Mann tarafından (kuarklardan da önce) öne sürülmüştür ve 1964'te Brookhaven National Laboratory'deki Nicholas Samios başkanlığındaki bir grup tarafından kanıtlanmıştır. Keşfedildiği zaman fizikçiler üç kuarkın var olduğuna ve yukarı, aşağı ve acayip kuarklardan oluşan mevcut parçacık setinin var olanı kapsadığına inanmaktaydılar. Ω^- bir kuark özelliği olarak renk yükünün varlığını destekleyici bir kanıt da oluşturmaktaydı. Ω^- 'yi oluşturan üç acayip kuark özdeş olsaydılar, Pauli dışarlama ilkesi onların aynı hareket durumunda olmalarını engelliyor olurdu. Birleşirlerse, lityum atomundaki üçüncü elektron gibi, birinin daha fazla enerjiye sahip olması gerekir (ilk ikisi spinleri zıt yönde, aynı enerji durumunu paylaşabilir). Ω^- 'nin göreli düşük enerjisi (düşük kütlesi) bileşen üç kuarkın aynı hareket durumunda olabileceklerini gösterir. Bu birbirlerinden *renk yükü* dediğimiz kuantum özelliği yönüyle ayrışıyorlarsa mümkün olabilir. Ω^- tüm gözlemlenen parçacıklar gibi "renksiz" olduğu için, bileşen üç kuarkın belli bir anda kırmızı, yeşil ve mavi olmaları zorunludur.

Ω^- 'nin bozunumunun baskın biçimi, Tablo A.4'te gösterildiği gibi, bir lambda-sıfır ve bir negatif kaondur:

$$\Omega^- \rightarrow \Lambda^0 + K^-$$

Kuark bileşenleri açısından:

$$sss \rightarrow uds + \bar{u}s$$

Acayip kuarkların sayısının üçten ikiye düştüğünü, aşağı kuarkların sayısının sıfırdan bire çıktığını görüyoruz. Dolayısıyla Λ^0'ın bozunumunda olduğu gibi bir acayip kuark bir

aşağı kuarka dönüşmüş durumda, acayiplikteki bu değişiklik Ω^- 'nin neden bu kadar uzun yaşadığını açıklıyor. (Bu bozunumda bozunum sonrasında bir yukarı ve bir karşı-yukarı kuark kaldığı için yukarı kuarkların sayısının sıfır kaldığına dikkat ediniz.)

Ω^-'nin bozunumundan kalan kaon, bir acayip mezon örneğidir. Bir acayip kuark ve bir karşı-yukarı kuarktan oluşur. Onun bozunumu da, sadece zayıf etkileşimle güdülenmekte olan acayiplikteki değişiklik yüzünden, yavaştır. Elektrik yüklü kaon tipik biçimde bir müon ve müon çeşnisinden bir karşı nötrinoya bozunur:

$$K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

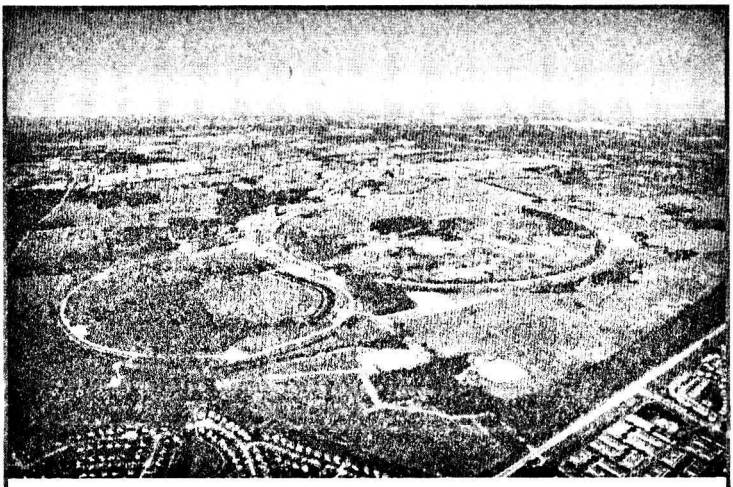
Kuark bileşenleri açısından bozunum:

$$\bar{u}s \rightarrow \text{kuark yok}$$

Kuark sayısı öncesinde de, sonrasında da sıfırdır. Aslında *tüm* mezonların kuark sayısı sıfırdır ve hepsi kararsızdır.

Bileşik parçacıkların büyüklükleri değişkenlik gösterebilir, ancak çoğu proton ve nötronla hemen hemen aynı büyüklüktedir: yaklaşık 10^{-15} m. Tipik bir atomun boyutlarından yaklaşık olarak yüz bin kat daha küçük olan bu boy, küçük gözükmektedir. *Küçüktür*. Birkaç kuark ve gluonu bir araya toplayıp onların enerjik hareketliliğine yetecek kadar da büyüktür.

Bileşik parçacıklar yüksek-enerjili hızlandırıcılarda bol miktarda üretilebilmektedirler. Uzun yıllar boyunca Chicago yakınlarında kurulu Fermilab'daki Tevatron enerji lideri konumundaydı. Her biri 1 TeV enerjili üç proton ve karşı proton çarpıştırılmakta, ortaya çıkan 2 TeV veya 2000 GeV, bir diğer deyişle 2 milyon MeV yeni parçacıklar elde etmeye uygun bir ortam sunmaktaydı. Bu enerjide bir tek proton-karşı proton çarpıştırmasında dahi düzinelerce hatta yüzlerce parçacığın ortaya çıkartılması şaşırtıcı olmamaktadır. İsviçre, Cenevre'deki CERN'de kurulu Büyük Hadron Çarpıştırıcısı 2012'den sonra tam güçle çalıştırıldığında en güçlü olma sıfatını ka-



Fermilab Tevatron'daki dört mil uzunluğundaki çember ve daha küçük enjektör çemberi (zemin üstünde) Chicago'nun batısında bir bölgede yer almaktadır.

zanacaktır. Bu kitabı okuduğunuz anda, bu çarpıştırıcı 7 TeV protonları başka 7 TeV protonlara yönelterek Fermilab'da elde edilen toplam enerjinin yedi katına ulaşmış olabilir.[53]

Biri Kaliforniya, diğeri Japonya'da olmak üzere iki hızlandırıcı "B fabrikası" olarak, 5 GeV'den fazla olan göreli büyük kütleleri, zayıf etkileşimin ince ayrıntılarının araştırılmasına uygun olduğu anlaşılan B mezonlarının büyük sayılarda üretimi için inşa edilmiştir. Bir B mezonu, bir karşı-alt kuark ve bir ilk veya ikinci nesil kuark (yukarı, aşağı, acayip veya tılsım) bileşiminden oluşur. Pek çok bozunum biçimi vardır. Bunlardan birinde B mezonunun karşı-alt kuarkı, bir karşı-tılsım kuarka dönüşür. Diğer biçimlerde bir lepton-karşı lepton çifti yayınlanır. Her durumda bozunumu yönlendiren zayıf etkileşimdir ve B'nin yarı-ömrünü 10^{-12} saniye uzunluğunda tutar. Zayıf etkile-

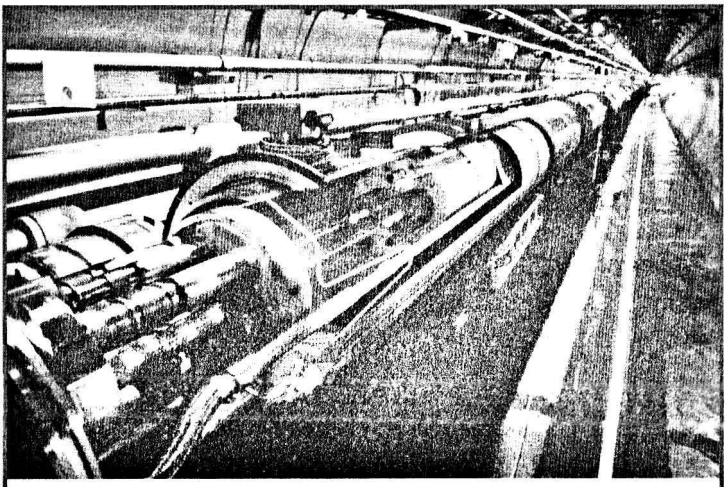
53 Süper-iletken Süper Çarpıştırıcı projesi maalesef 1993 yılında Amerikan Kongresi tarafından iptal edildi. Texas, Waxahachie bölgesindeki kırk dört millik dairesel bir tünel içerisinde protonların 20 TeV'lik bir enerjiye ulaşarak çarpıştıklarında 40 TeV sunmaları öngörülmekteydi.

şimin B bozunumu tarafından açıklığa kavuşturulan özelliği, *CP korunumu* olarak adlandırdığımız şeyin ihlalidir (Soru 61).

47. Her parçacığın bir fermiyon ya da bir bozon olması zorunlu mudur? Bu iki sınıfı ayıran nedir?

Gerçekten (en azından bir fizikçinin parçacık olarak adlandırdığı) her parçacık ya fermiyon ya da bozondur. Ancak her *varlık* fermiyon ya da bozon değildir. Basket topu değildir, montaj hattından çıkan bir otomobil değildir, bir kum zerresi de değildir. Konu özdeşlikle ilgilidir. İki veya daha fazla şey özdeşse – her yönden tamamıyla özdeş iseler – o zaman bu "şeylerin" ya fermiyon ya da bozon olması gerektiğini söylememiz için haklı gerekçemiz vardır. Top, otomobil veya kum zerrelerinin hiçbiri bir diğeriyle gerçek anlamda özdeş değildir. Fermiyon-bozon sınıflandırmasından kurtulurlar. Öte yandan her elektron bir diğer elektronla özdeştir (veya öyle olduğuna inanıyoruz ve bunun doğru olduğuna dair çok sayıda kanıtımız var). Elektronlar fermiyondur. Her bir pion, başka herhangi bir pionla özdeş olduğuna dair kanıtlar sunmaktadır. Pionlar bozondur.

Fermiyon ya da bozon olmak için, bir "şeyin" elektron ya da pion kadar küçük olması gerekmez. Bir atom ya da molekül kadar büyük de olabilir. Önemli olan, "şeyin" özdeş kardeşlerinin var olmasıdır. Rubidyum–85 atomu örneğin bir bozondur. Bir atomun bozon mu fermiyon mu olduğunu anlamayı sağlayan bir kural vardır. Bileşiminde bulunan fermiyonların sayısını sayın. Bu sayı çiftse, atom bozondur. Sayı tekse, atom fermiyondur. Her atom ve molekülün temel bileşenlerinin fermiyon olduğuna dikkat edin –elektronlar, protonlar ve nötronlar veya bir katman aşağı inerseniz elektron ve kuarklar. Her iki durumda da tek-çift aritmetiği karşımıza çıkar. Rubidyumun element sayısı 37'dir; dolayısıyla rubidyum–85 atomu, 37 proton, 48 nötron ve 37 elektron –toplamda 122 fermiyon içerir ve sonuç olarak bileşik varlık bir bozondur. (Diğer yoldan giderek atomdaki 255 kuark ve 37 elektronu toplarsanız 292 fermiyon sayısına ulaşırsınız, yine çift sayı.) Ters yönden bir örnek olarak, uranyum–235 atomu çekirdeğindeki 235 nükleon ve çevre-



Fransa ve İsviçre'nin altından geçen 27 km'lik uzun tünelin içinde Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (Large Hadron Collider). Geniş silindirlerin içinde, proton ışınını yönlendiren mıktanıslar vardır. Yanyana duran ince silindirlerin içinde proton ışın demeti yol alır. Photo ©Cern

leyen buluttaki 92 elektronla tek sayılı fermiyonlardan oluşur ve kendisi de bir fermiyondur.

Tüm bunlar "olasılıkları isimlendirme" olanağı sunmaları dışında niçin önem taşıyor? Kuantum fiziği işte burada devreye giriyor. İçinde iki parçacıktan başka bir şey olmayan bir küçücük kutu düşünün. Parçacık–1, diyelim ki, A hareket durumunda; parçacık–2 de B hareket durumunda olsun. Parçacıklar birbirlerinden farklıysalar, konuşacağımız konu bileşik hareketleri olur. Peki ya özdeşseler? O zaman parçacık–1'in A durumunda, parçacık-2'nin B durumunda mı, yoksa parçacık 1'in B durumunda, parçacık 2'nin A durumunda mı olduğunu söyleyemezsiniz. Bunu *bilemezsiniz.* Parçacıklar özdeş olduğu için, hangi parçacığın hangi durumda olduğunu tespit etmenin bir yolu yoktur. Kuantum fiziğinin yanıtı, *her bir* parçacığın *her iki* durumda olduğudur. Üst üste binmiş durumdadırlar. Örneğin bir elektronu taban durumunda, diğer elektronu da uyarılmış durumda olan bir helyum atomunu düşünün. Her bir durumda

bir elektron olduğunu bilirsiniz, ama hangi elektronun hangi durumda olduğunu bilmez ve *bilemezsiniz.*

Kuantum kuramında bir parçacığın ya da bir sistemin durumu bir "dalga fonksiyonu" ile gösterilir. Klasik fizikte fiziksel anlamdaki tüm nicelikler –kütle, hız, elektrik yükü, manyetik alan ve diğerleri– ölçülebilir durumdadır. Böylesi niceliklerin tümü aynı zamanda "gözlemlenebilir". Kuantum kuramında durum böyle değil. Dalga fonksiyonu; önemli ve anlamlı olan, ancak gözlemlenebilir *olmayan* nicelikler için bir örnek oluşturmaktadır. Dalga fonksiyonun karesi ise gözlemlenebilir.[54] Karesi alınan bu nicelik, parçacığı belli bir durumda ya da belli bir yerde bulma olasılığını verir. Klasik fizik ile kuantum fiziği arasındaki bu ince ayrım, bozon ve fermiyonların davranışını kavrama açısından büyük önem taşımaktadır.

Şimdi biraz matematiğe girerek bunun kafanızı karıştırmaktan ziyade bir nebze olsun açıklık sağlamasını umut edeceğim. Parçacık–1 A durumunda ve parçacık–2 B durumundaysa, bu durumu açıklayan dalga fonksiyonu oldukça şematik olarak A(1)B(2) şeklinde yazılabilir. Ancak yukarıda vurguladığımız üzere parçacıkların özdeşliği yüzünden 1 ve 2'nin yer değiştirmesi bir şeyi değiştirmez. A(2)B(1) dalga fonksiyonunun aynı durumu ifade etmesi gerekir. Kuantum teorisyenlerinin bu muğlâklıkla başa çıkmak için buldukları bir yol, A ve B durumundaki iki özdeş parçacığın dalga fonksiyonun şu toplam olduğunu söylemek:

$$A(1)B(2) + A(2)B(1)$$

Bu birleşimde 1 ve 2 yer değiştirirse bir şeyin değişmediğini görüyoruz. Ancak başka bir olasılık daha var. A ve B durumlarındaki özdeş parçacıkların bileşik durumu için dalga fonksiyonu, şu fark biçiminde ifade edilebilir:

54 Teknik olarak ölçülebilir olan, dalga fonksiyonunun karesinin mutlak değeridir. Dalga fonksiyonu ise matematikçilerin karmaşık dediği, hem gerçek hem de sanal bölümleri olan bir sayıdır. Dalga fonksiyonunun kendisi ölçülebilir bir nicelik olmadığı için bu mümkün olmaktadır.

$$A(1)B(2) - A(2)B(1)$$

Şimdi 1 ve 2'nin yerini değiştirirseniz, daha önce elinizde olan sonucun negatifini elde edersiniz; ancak yine de bir sorun yoktur, çünkü fiziksel olarak anlamlı olan nicelik, gözlemlenebilir olan, dalga fonksiyonunun karesidir ve bir niceliğin karesi ile negatif değerinin karesi de aynı olur.

Toplama ve çıkarma, bir bileşik dalga fonksiyonunun kurulmasında sadece bu iki olasılık değil, başka biçimler de olası olsa gerek; ancak doğa sadece bu iki olasılığı seçmiş gibi görünüyor. Bileşik dalga fonksiyonu iki terimin toplamı olan parçacıklara *bozon* deniyor. Bileşik dalga fonksiyonu iki terimin farkı olan parçacıklara ise *fermiyon* deniyor. Şu anki bilgimize göre, tüm parçacıklar –çok büyük sayıda özdeş kopyası olan tüm parçacıklar– ya bozon ya da fermiyondur.

Bu matematik bulmacasında vurgulanması gereken son ve önemli bir husus daha var. A ve B durumları aynıysa, o zaman ne olacak? Bu parçacıkların sadece özdeş değil, aynı zamanda aynı hareket durumunda olması demektir. Bozonlarda, yukarıdaki toplanmış dalga fonksiyonu bu sefer şu hale gelir:

$$A(1)A(2) + A(2)A(1)$$

Sorun yok. Bu $2A(1)A(2)$ ile aynı şey. Öte yandan fermiyonlarda negatif işaretli dalga fonksiyonu bu durumda şu hale gelir:

$$A(1)A(2) - A(2)A(1)$$

Büyük sorun var. Bu birleşim sıfıra eşittir. İki özdeş fermiyon aynı hareket durumunda *olamaz*. Wolfgang Pauli elektronlar için dışarlama ilkesini ilk kez ortaya attığında, meseleyi bu yönlerden düşünmüş değildi. Sadece atomik yapı özelliklerinin nedenini açıklamaya çalışıyordu. Dışarlama ilkesinin dalga fonksiyonları yönünden açıklanması daha sonra yapıldı. Aslında ilkeyi ilk ortaya atışından onbeş yıl kadar sonra Pauli, bizzat matematiksel çıkarsamasını sunarak tek tamsayının

yarısı spine sahip parçacıkların (elektron ve protonlar gibi) fermiyon olduğunu ve bunların dışarlama ilkesine uyduklarını, öte yandan (fotonlar ve pionlar gibi) tamsayı spine sahip parçacıkların bozon olup bunların dışarlama ilkesine uymadıklarını gösterdi.

Gözlemlenemeyen bir dalga fonksiyonunda eksi işareti gibi basit bir şeyin, elektronların periyodik tablonun tüm bir yapısı üzerinde belirleyici olan ayırt edici davranışlarının ve dolayısıyla bizlerin bunun üzerinde uzun uzun uzadıya düşünmemizin nedeni olabilmesi, başlı başına olağanüstü değil mi?

48. Bose-Einstein yoğunlaşması nedir?

Uranyum atomundaki doksan iki elektronu, büyük bir apartmanda ikamet eden ve her biri girişe olabilecek en yakın yerde oturmak isteyen doksan iki apartman sakinine benzetebiliriz (bu "istem" elektronlar için mümkün olan en az enerjiye sahip olmayı istemek anlamına gelir). Eğer apartman sahibi kiracılara her dairede bir kişinin oturmasını şart koşan bir "dışarlama ilkesi" kısıtlaması koyarsa, daireler zeminden başlayarak 92 numaraya kadar dolar, 92 numaranın üzerindeki daireler de boş kalır. Daireler derken burada elbette hareket durumlarını kastediyoruz. Atomu "uyarmak" için enerji eklenirse, bir elektron geçici olarak daha yüksek bir enerji durumuna sıçrayabilir. Bunu coşkulu bir apartman sakininin, daha alt katlarda oturma tercihine karşın, geçici olarak üst taraflardaki boş dairelere taşınmasına benzetebiliriz.

Bir metaldeki elektronlarda, sadece küçük bir metal parçasında bile elektron sayısının sayısız trilyon çoklukta ve enerji düzeyleri arasındaki ara boşlukların da neredeyse ölçülemeyecek kadar küçük olmasını hariç tutarsak, durum benzerdir. Yine de, elektronların sayısının olağanüstü büyüklüğüne ve enerji düzeyleri arasındaki aralıkların olağanüstü küçüklüğüne rağmen, dışarlama ilkesi amansız iradesini konuşturur. Elektronlar enerji yönünden en son gelen en yüksek düzeyde olacak şekilde ve alttaki tüm düzeyler dolu ve üstteki tüm düzeyler boş olacak tarzda "kümeleşirler".

Carl Wieman (d.1951) ve Eric Cornell (d.1961) 1996 yılında Boulder Colorado'da bu pozu bir önceki yıl rubidyum atomlarından oluşan bir gazda Bose-Einstein yoğunlaşmasını yaratma başarılarının ardından gelen haklı gülümsemeleriyle vermişler. Wieman fizik araştırmalarındaki başarılarından dolayı Nobel Ödülü'ne değer görülmekle kalmamış, aynı zamanda fizik eğitimine katkılarından dolayı Amerikan Fizik Öğretmenleri Birliği'nin onur madalyasına layık görülmüştür. 2010 yılında da Beyaz Saray'ın Bilim ve Teknoloji Politikası ofisine katılmıştır. Bir Stanford mezunu olarak parçacık fiziğiyle ilk temasından özel bir haz duymamış olan Cornell, bugün halen Boulder'daki laboratuarında ultrasoğuk fermiyonlar ve bozonlar üzerine çalışmalarını sürdürmektedir.

En sonunda mutlak sıfır veya ona yakın sıcaklığa –boş veya dolu durumlar arasındaki keskin ayrım çizgisine ulaşmanın– yolu budur. Sonlu sıcaklıkta elektronların ısı enerjisi de meseleye dahil olur. Enerji "kümesinin" üst tarafına yakın birkaç elektron daha yüksek durumlara sallanır, böylece birkaç yer boş kalır. Bu durum, apartmandaki kısmen dolu olan birkaç kattan oluşan bir çeşit "geçiş alanına" benzetilebilir. Bu alanın üstündeki tüm daireler boştur. Onun altındaki tüm dairelerse tamamen doludur.

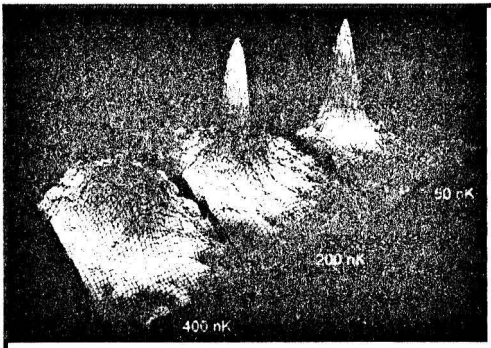
Apartman sakinleri fermiyonlar değil de bozonlar olursa ne olur? O zaman mülk sahibi dışarlama ilkesini şart koşamaz. Kiracıların hepsi giriş katındaki dairelerde toplaşabilirler. Bu durumda bozonlar aynı durumda olma *yetisine* sahip olmakla kalmaz, bunu yapmayı tercih etme hakları da vardır. Tümü yumaklaşarak en alt hareket durumunda yer alırlar. Ancak burada da yine termal hareket devreye girer. Bozonların biraraya gelerek gerçekten tek bir durumu – taban durumunu – paylaşabilmeleri, sadece her birinin ulaşabildiği enerji aşırı derece-

de küçük olursa mümkün olur. Aksi durumda termal sallantı birçok bozonu kümelenme eğilimlerini engelleyecek şekilde, daha yüksek enerjili durumlarda tutar.

Soru 47'de bahsettiğimiz rubidyum-85 atomları gibi bozonlardan oluşan bir gaz mutlak sıfıra yakın dereceye gelecek şekilde soğutulursa, birçok atom gerçekten en düşük hareket durumunu paylaşabilir ve hiçbir atomun diğerinden ayırt edilemediği, tamamen örtüşen veya daha iyisi birbirinin içine geçen bir şekilde kümelenebilir. Apartman sakinlerinin en alt kattaki daireyi paylaşmakla kalmayıp artık her birinin daireye yayınlanmış bulanık bulutlara dönüştüklerini düşünün. (Ancak panjurlar sıkıca kapatılmış olmalı. Daireye en küçük bir enerji girdiğinde, kiracılar yine özgün hallerine döneceklerdir.) Böylesi bir kümelenmeye *Bose-Einstein yoğunlaşması* diyoruz. Bu olgunun varlığı 1924 yılında Albert Einstein tarafından öngörüldü ve bu 1938'de keşfedilen sıvı helyumun üstün akışkanlığının açıklanmasını sağladı (Soru 89). Araştırmacıların serbest hareket eden parçacıklardan oluşan bir gazdaki Bose-Einstein yoğunlaşmasını kavramaları için yine de yılların geçmesi gerekti. 1995 yılında Boulder, Colorado'da çalışan Carl Wieman ve Eric Cornell olguyu rubidyum atomlarından oluşan bir gaz üzerinden göstermeyi başardılar. Atomlardan oluşan (Wieman ve Cornell'in ilk denemelerinde birkaç bin atom sözkonusuydu) bir gazı soğutarak mutlak sıfır derecesinin milyonda birinin kesrine dek yaklaştırmak için gereken araçlar o zamana dek elimizde yoktu. Sayfadaki fotoğraf 200 nK (mutlak sıfırın 200 milyarda bir derece üstü) sıcaklıktaki Bose-Einstein yoğunlaşması başlangıcını gösteren verileri göstermektedir.

O günden beri M.I.T.'deki Wolfgang Ketterle'den başlayarak[55] sodyum atomlarını (sodyum-23, onbir proton, oniki nötron ve onbir elektronuyla bir bozondur) kullanan birçok başka araştırmacı da Bose-Einstein yoğunlaşmasını elde etmeyi başardı. Bu yoğunlaşmalar (İngilizce başharfleriyle dendiği gibi BEC'ler) pratik uygulama alanı bulabilecekler mi? Bu soruya

55 2001 Nobel Fizik Ödülü Weiman, Cornell ve Ketterle tarafından paylaşıldı.



Wieman ve Cornell'in sıcaklık 400'den 200'e sonra da 50 nK'ye (mutlak sıfırın bir derecenin milyarda biri kadar üstüne) düşürüldüğünde, rubidyum atomlarından oluşan bir buluttaki hız dağılımını gösteren veri haritası. Sıcaklık 200 nK veya daha azken ortaya çıkan yükselti, atomların sıfıra-yakın hızda hareket ettiği Bose-Einstein yoğunlaşmasının oluşumunu gösteriyor.

hayır yanıtını vermek tehlikeli olur. Maddenin yeni bir biçimi üzerine kavrayış ve kontrollerini geliştirdiklerinde bilim insanları bunu pratik amaçlar için kullanmanın bir yolunu –hiç bulamadıkları durumlardan daha büyük bir frekansla- buldular. Ancak bu kez mücadelenin zorlu geçeceği görülüyor.

49. Bozon ve fermiyonlar isimlerini nereden aldılar?

1924 yılında Dakka[56] Üniversitesi'nden Satyendra Nath Bose adlı otuz yaşındaki bir fizikçi, o dönem Berlin'de olan Albert Einstein'a gönderdiği mektubuna ek olarak "Planck Kanunu ve Işık Kuantası Hipotezi" başlıklı bir yazı iliştirir. İngilizce yazılmış bu yazı, kısa bir süre önce ünlü İngiliz dergisi *Philosophical Magazine* tarafından reddedilerek geri çevrilmiştir. Kimbilir neden? Uzak bir diyardaki adı sanı belirsiz birinden geldiği için mi? Ele aldığı konu "varsayımsal" ışık kuantası (bunun için o dönemde gerçekten güçlü kanıtlar vardı) olduğu için mi? Her ne kadar yeni bir yolla da olsa, zaten bilinen bir sonuca – Planck'ın radyasyon içeren bir kovukta farklı frekanslar arasındaki enerji

56 Bugün Bangladeş'in başkenti olan Dakka, o dönem Hindistan'a bağlıydı.

dağılımı kanunu – ulaştığı için mi? Britanyalı editörler bilmese de, önemli bir şey yaptığını *bilen* Bose, yaşayan en ünlü fizikçiye ulaşmaya karar verir (Bose, Einstein'ın görelilik metnini Hindistan'daki bilim dünyası için Almanca'dan İngilizce'ye çevirmiştir). Einstein yazıyı okur, önemini derhal teslim eder, metni bizzat Almanca'ya çevirir ve vakit kaybetmeksizin önemli bir Alman dergisi olan *Zeitschrift für Physik*'te basılmasını sağlar.

Bose'nin yaptığı, Planck yasasından çıkarsama yapmak ve bir kovuktaki ışınımın birbirleriyle etkileşime geçmeyen ve başka bir ışık kuantumunun daha öncesinden bu durumu işgal edip etmemiş olmamasından bağımsız olarak,[57] herhangi bir enerji durumunda olabilen "ışık kuantasından" (modern terminoloji ile fotonlardan) oluşmuş bir "gazdan" ibaret olduğunu varsayım olarak kabul etmektir. Gazdaki parçacıklar toplam enerjiyi korumalı (bir kuantumda artarsa, diğerinde azalmalı) ve istatistiksel mekaniğin genel ilkelerine uymalıydılar.

Einstein Bose'nin çalışmasının, Bose'nin halen hipotez olarak adlandırdığı, ancak Einstein'in yaklaşık yirmi yıl önce öne sürdüğü ve doğru olduğundan hiçbir kuşku duymadığı ışık kuantumunu destekleyen üçüncü bir dayanak olduğunu derhal kavradı. Önceki iki dayanağın birincisi, metal bir yüzeyde soğurulan her ışık kuantumunun tüm enerjisini bir elektrona verdiğini gösteren fotoelektrik etkiydi. Diğeri ise bir önceki yıl Amerikalı fizikçi Arthur Compton tarafından keşfedilmiş olan ve X-ışını fotonunun atomdaki bir elektrondan bir bilardo topu diğerinden sekermişcesine sektiğini ortaya koyan Compton etkisiydi.

Einstein Bose'nin çalışmasına onun fikirlerini alarak geliştirdiği iki sayfalık bir yazı kaleme alarak gereken ilgiyi göstermiş oldu. Özel olarak Einstein, etkileşimsiz atomlardan - maddesel parçacıklardan - oluşan bir gazın yeterli düşüklükte bir sıcaklıkta daha sonra Bose-Einstein yoğunlaşması olarak adlandırılacak olan şekilde bir yoğunlaşma göstereceğini öngören kişi oldu.

---

57 Bose kimi parçacıklarda dışarlama ilkesinin geçerli olabileceği yönünde bir sezgiye sahip değildi. Pauli'nin elektronlar hakkındaki önermesi bir sonraki yıl gerçekleşti.

Klasik fiziğin hüküm sürdüğü zamanlarda fizikçiler bir gazdaki atomların bir anlamda özdeş olsalar da – örneğin helyum atomları – herşeye karşın tanılanabilir ölçüde farklı olduklarını varsayarlardı. 1 numaralı helyum atomu, 2 numaralı helyum atomu vs diyebilirdiniz. Prensip olarak 1 numaralı atomu izleyebilir ve izini kaybetmeksizin seyahatlerini takip edebilirdiniz. Bu tip bir atom yığınının belli bir sıcaklık altında ortalama olarak nasıl hareket ettiği, ondokuzuncu yüzyılın sonunda yaşamış iki büyük bilim adamı, Britanyalı fizikçi James Clerk Maxwell ve Avusturyalı fizikçi Ludwig Boltzmann'dan ismini alan ve matematiksel olarak *Maxwell-Boltzmann istatistiği* adı verilen yolla tanımlabilirdi. Kuantum etkileri göz ardı edilirse, örneğin oda sıcaklığında helyum gazı yüklü bir kap sözkonusu olduğunda, bu açıklama halen geçerli görünmektedir.

Bose ve Einstein Maxwell ve Boltzmann'ın istatistiğini, kuantum kuramına göre özdeş parçacıkların *hakikaten* özdeş, hakikaten birbirlerinden ayırt edilemez oldukları gerçeği doğrultusunda modifiye etmişlerdir. Bir grup özdeş parçacık içerisinden bir tanesini seçerek etiketlemek ve hareketini izlemek gibi bir şey prensipte bile sözkonusu olamaz. Maddenin dalga doğası ve olasılık yasalarının hüküm sürmesi bunu olanaksız kılmaktadır. Hakiki özdeşlik hesaba katıldığında yeni bir istatistik ortaya çıkar ve buna *Bose-Einstein istatistiği* adı verilir. Normal sıcaklıktaki seyreltik gazlarda Bose-Einstein istatistiği, Maxwell-Boltzmann istatistiğinden farklılık göstermez (Soru 3'te ele aldığımız uyumluluk ilkesine bir örnek). Ancak yeteri kadar düşük sıcaklıklarda parçacıkların kuantum özdeşliği önem kazanmaya başlar. Dolayısıyla öngörülen Bose-Einstein yoğunlaşması da klasik beklentiye tamamıyla ters düşer.

Bose ve Einstein'ın çalışmalarını, Pauli'nin elektronlar için dışarlama ilkesini geliştirmesinden bir yıl önce gerçekleştirmiş olduklarını hatırımızda tutalım. Pauli'nin ilkesi, özdeş parçacıklara yaklaşım açısından bir dönemeç oldu. Bose ve Einstein özdeş parçacıklarının aynı hareket durumunda olabileceğini varsaymışlardı. Elektronlar ve sonrasında tek tamsayının yarısı spine sahip parçacıklar ise aynı hareket durumunda olamazlardı. Dolayısıyla özdeş parçacıklar ikiye ayrılırlar.

İtalyan fizikçi Enrico Fermi ve Britanyalı fizikçi Paul Dirac dışarlama ilkesine uyan parçacık grupları üzerine olan çalışmalarıyla öne çıkan bilim insanları oldular. Bugün *Fermi-Dirac istatistiği* dediğimiz çalışmalarını gerçekleştirdiklerinde her ikisi de yirmilerindeydi.

İsimlendirmeye dönersek, özdeş parçacıklar iki ayrı çeşit olduğu için farklı isimler gerekiyordu. Bose-Einstein istatistiğine uyan parçacıkların *bozon* olarak adlandırılmalarını öneren Paul Dirac oldu (Kimbilir belki de *einsteinon* demenin ağzı yoracağını veya Einstein'ın zaten yeterince ünlü olduğunu düşünmüş olabilir). Peşi sıra aynı Dirac, alçak gönüllüğü ile ünlü bu bilim insanı, Fermi-Dirac istatistiğine uyan parçacıkların da *fermiyon* olarak adlandırılmalarını önerdi. Her iki önerisi de tuttu.

IX. Bölüm

Etkileşimler •

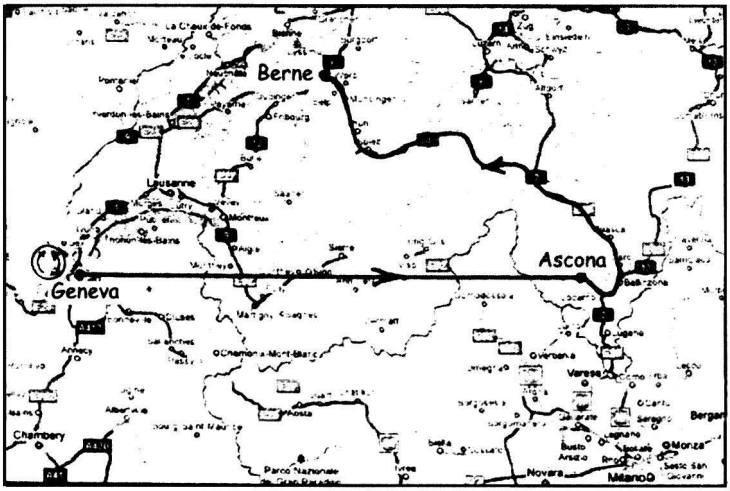
50. Feynman diyagramı nedir?

Richard Feynman parlak zekâlı, neşe dolu, olağanüstü meraklı, herkes tarafından takdir edilen bir fizikçiydi; doktora derecesini 1942 yılında Princeton Üniversitesi'nden aldı, henüz yirmili yaşlarında II. Dünya Savaşı'ndaki Manhattan Projesi'ne önemli katkılarda bulundu, savaştan sonra da parçacık fizik teorisinde dünyaca tanınan biri haline geldi. 1965 yılında aldığı Nobel Fizik Ödülü'ne (Amerikalı Julian Schwinger ve Japon Sin-Itiro Tomonaga ile paylaşmıştır), kuantum elektrodinamiği (veya *QED*) dediğimiz, fotonların yüklü parçacıklarla, özellikle de elektronlarla ve karşı parçacıkları olan pozitronlarla etkileşimi üzerine olan çalışması nedeniyle layık görülmüştür (*bkz.* Soru 7'deki dipnot). Kendisine borçlu olduğumuz Feynman diyagramı, parçacıklar bozunum geçirdiğinde veya diğer parçacıklarla etkileşime girdiğinde en temel düzeyde ne olduğunu gösteren bir uzayzaman şemasıdır.

Uzay diyagramları birbirine benzer. Haritadırlar. Uzayzaman diyagramları ise daha az bilinir, ancak kavranması zor değildir. Şekil 24'de bir harita (yer diyagramı), İsviçre'deki Cenevre'den Ascona'ya doğu yönünde uçuş yolunu izleyen bir otomobil yolculuğu ile dağları aşarak (Einstein'ın ünlü üretken yılı 1905'te yaşadığı ve çalıştığı) Bern'e ulaşan güzergâhı göstermektedir. İyi ölçümlendirme maksadıyla söyleyelim, haritada Cenevre yakınlarındaki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'ndaki ters yönlü proton demetleri ölçek kullanılmadan gösterilmiştir. Uçuş yüksekliği belirtilmediği gibi, protonların kat ettikleri yolun derinliği de gösterilmemiştir, araba yolculuğundaki iniş çıkışlar da aynı şekilde göz ardı edilmiştir. Haritadaki çizgiler matematikçilerin ifadesiyle *iki boyutlu yüzeye düşürülmüş bir izdüşüm*dür.

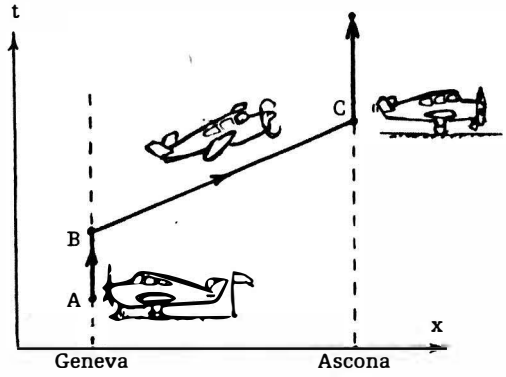
Şimdi bir uzayzaman haritasında sadece Cenevre-Ascona uçuşunu ele alalım (Şekil 25). Bu haritada sadece bir uzay yönü vardır, doğu-batı, yatay eksende gösterilmiştir. Yine sadece bir zaman yönü vardır, o da dikey eksende gösterilmiştir. Uçak Cenevre'de kalkıştan önce park halindeyken, bu diyagramdaki

Richard Feynman (1918–1988), burada 1962 yılında görülüyor. Şaşılacak derecede çok yönlü, meraklı ve eğlenceli bir fizikçi olan Feynman süper bilgisayarlardan süper iletkenliğe ve temel parçacıklara dek birçok konunun anlaşılmasına büyük katkılar sağlamıştır. Kitaplarından *Feynman Lectures on Physics* büyük başarı kazanmış ve *Surely You're Joking, Mr. Feynman* ise bir bestseller olmuştur. Challenger uzay mekiği faciasından sonra Beyaz Saray Araştırma Komisyonu'nun üyesi olarak Feynman, bir basın konferansında O-contasının zayıflığını buzlu suda nasıl kırılgan olduğunu teatral biçimde göstererek açıklamıştı.



Şekil 24: Bir uzay haritası

"yolu" düz dikey bir çizgidir. Uçak uzayda hareket etmemektedir, ancak zamanda hareket etmektedir. Ascona'ya uçarken uzayzaman yolu dikeyden yana yatan bir çizgiye dönüşür. Bu durumda uçak hem mekânda hem de zamanda hareket etmektedir. Hızı ne kadar yükselirse, bu çizginin eğimi o kadar büyür. Son olarak, uçak Ascona'ya iniş yapıp (küçük) havaalanına park ettikten sonra, uzayzaman yolu yeniden dikey çizgi halini alır. Bu tip bir uzayzaman haritasında her bir noktaya bir *olay* denmektedir. Böylesi birkaç nokta haritada gösterilmiştir. Çizgilere ise *dünya çizgileri* adı verilmektedir. Bu tip diyagramlarda dikkat edilen durumlar genellikle bir dünya çizgisinin bir biçimde değiştiği durumlardır; uçağın hareket etmeye başlaması ya da hareketini sonlandırması gibi. (Gerçekte elbette B ve C noktalarındaki değişiklikler kesikli değildir.) Diyagram hakkında dikkat etmemiz gereken son bir şey daha: Dünya çizgileri üzerinde ok işaretleri vardır, bunlar olayların geliştiği yönü gösterirler: A'dan B'ye veya C'den D'ye. Bu ok işaretleri bir açıdan lüzumsuzdurlar, çünkü olayların gelişebileceği başka bir yön yoktur. Uçak C'den B'ye uçamaz, çünkü bu zamanda geri gitmek anlamına gelir. Büyük ölçekli dünyamızda olaylar zaman yönünden merhametsizce sadece tek bir yönde, uzayza-

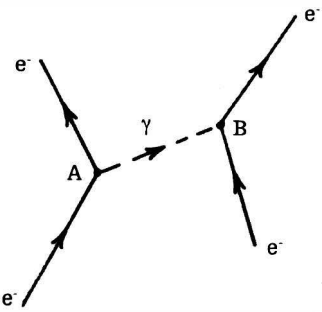


Şekil 25: Bir uzayzaman haritası

man haritasındaki yukarıya doğru gösterilen yönde gelişirler. Ancak –artık buna şaşırmayacağınızı tahmin ediyorum– işler kuantum dünyasında farklı yürür. Bunlar uzayzamanda pek küçük parçalar da olsa, parçacıklar zamanda ileri doğru olduğu gibi, geriye doğru da hareket edebilirler.

Feynman atom-altı dünyasındaki olaylarda küçük uzayzaman haritalarının, parçacıklar etkileşime girdiğinde ne olduğunun gösterilmesi ve kataloglanması için elverişli bir yol olduğunun farkına varmıştı. Feynman'ın ellerinde bu diyagramlar daha fazlasına da hizmet ettiler: Farklı olayların olasılıklarının hesaplanmasının aracı haline geldiler. Burada diyagramların temel olayların resimli sunumlarındaki faydasını vurgulamak istiyorum.

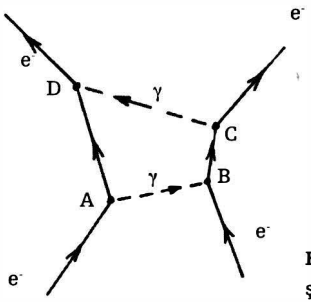
Şekil 26 ve 27'de (sayısız olasılık içerisinden seçilmiş) iki Feynman diyagramı görülüyor. Diyagram bir elektronun bir diğeriyle etkileşimini gösteriyor. Klasik bakışla, iki elektron birinden diğerine doğru "uzanan" bir itici elektrik kuvvet sonucu etkileşirler. Yollarına birbirlerine doğru belirli bir güzergâh ve belirli bir hızla çıkmış olan elektronlar bundan saparlar ve farklı birer güzergâh ve hız edinerek birbirlerinden uzaklaşırlar. Etkileşimleri pürüzsüz ve sürekli olmuştur. Kuantum mekanik açıdan ise olay tamamen farklıdır. Olabilecek en basit şey Şekil 26'da gösterilmiştir. Diyagramın alt tarafından başlayalım; iki elektronun dünya çizgilerinin birbirlerine doğru



Resim 26: Bir foton alışverişiyle gerçekleşen elektron-elektron saçılımı.

ilerlediğini görüyorsunuz. A noktasında, soldaki elektron bir foton (veya bir gama ışını, bu yüzden γ sembolünü kullanıyoruz) yayıyor ve yönünü değiştiriyor, sola doğru açılarak gidiyor. B noktasında, bu foton ikinci elektron tarafından soğuruluyor ve bu elektron da yönünü değiştiriyor, sağa doğru açılarak uzaklaşıyor. "Küresel olarak" bakıldığında bu durum pek şaşırtıcı değil. İki elektron birbirine yaklaştı, etkileşti ve geri sekti. "Mikro ölçeksel olarak" (aslında mikro-ölçek-altından) bakıldığındaysa, bu durum oldukça şaşırtıcıdır. Etkileşim, uzayda yol alan bir kuvvet aracılığıyla değil, bir noktada yayınlanan ve başka bir noktada soğurulan bir fotonun verilmesi yoluyla gerçekleşmiştir. Bu durumda elektronların yön değiştirmelerinin bir "değişim kuvveti" sonucunda gerçekleştiğini söyleyebiliriz. Foton bir "kuvvet taşıyıcısı"dır. Uzay zamanda asli etkileşimler A ve B noktalarında gerçekleşmektedir.

Şekil 27 başka bir olasılığı resmetmektedir: Bir değil iki foton değişilmektedir. Toplam sonuç aynıdır: elektron sapması; ancak bu kez mekanizma biraz daha karmaşıktır. Bu iki şekilden yola çıkarak kanaat getirebileceğiniz üzere, bir çift elektronun foton alışveriş biçimleri ve foton sapmalarını resmeden Feynman diyagramlarının sayısında bir sınır yoktur. Kuantum fiziği aslında bize bu çeşit olası süreçlerin tümünün gerçekleşebileceğini ve bunların farklı olasılıklarla da gerçekleştiklerini söyler. Yüksek enerjilerde en basit süreçler ağır basar, dolayısıyla Şekil 26 ve 27 gerçekte ne olduğunu bize epey iyi biçimde resmetmektedir.



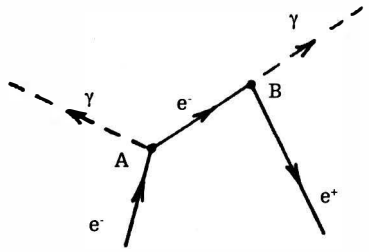
Resim 27: İki foton alışverişiyle gerçekleşen elektron-elektron saçılımı.

51. Feynman diyagramlarının ana özellikleri nelerdir?

Lepton, kuark veya her ikisinin, laboratuar gözlemi ile doğrudan ilişkilenen her etkileşimi[58] kapsayan Feynman diyagramlarının tümünde görülen iki önemli özelliği Şekil 26 ve 27 bize vermektedir. Birinci olarak, her etkileşim noktasında (şekillerdeki A,B,C ve D noktaları) iki fermiyon çizgisi ve bir bozon çizgisi birleşmiştir. Fermiyonlar temel parçacıklardır (bu şekillerde leptondurlar; ancak başka diyagramlarda görüleceği gibi kuark da olabilirler). Bozonlar, onlara eşlik eden kuvvet taşıyıcılarıdır. Şekillerdeki bu etkileşim noktalarına *köşe noktaları*, resmi adıyla *üç uçlu köşe noktaları* denmektedir. Bugün doğru olduğuna inandığımız çarpıcı genelleme, evrendeki her kuark ve lepton etkileşiminin en nihayetinde iki fermiyon dünya çizgisi ile bir bozon dünya çizgisinin kesiştiği üç uçlu köşe noktalarının bir sonucu olarak gerçekleştiğidir.

Diğer dikkate değer özellik, *bir köşe etkileşim noktasında hiçbir şeyin canını kurtaramayacağıdır.* (Bunun açık gösterimi için *bkz.* Şekil 30.) Her etkileşim noktasında parçacıklar doğar ve yok olurlar. Köşe noktasına ulaşan parçacıklar, köşe noktasından ayrılan yeni parçacıklara yerlerini vermek üzere, yok olurlar. Şekil 26 ve 27'de bir elektron köşe noktasına varıyor, bir foton yayıyor ve yoluna devam ediyor gibi gözükebilir. Kuantum fiziği matematiğinin bize söylediğiyse, örneğin A

58 Bazı "saklı" etkileşimler, bir gluonla diğeri arasındaki gibi, burada belirtilen kurallara uymazlar.



Resim 28: Elektron-pozitron yok oluşunu gösteren Feynman diyagramı

köşe noktasında bir elektronun yok olduğu ve bir elektronun var olduğudur. Her elektron özdeş olduğu için, bunların aynı elektron olduğunu söylemek mümkün değildir. Kuram (deneyle desteklenmiş olarak), bize başka bir çarpıcı genelleme daha sunmaktadır: Evrendeki tüm etkileşimler, parçacıkların yaratılış ve yok oluşunu içermektedir.

Şekil 26 ve 27'de parçacıkların dünya çizgileri üzerinde, zamanda ileriye doğru hareket ettiklerini belirten oklar görülmektedir. Kuantum kuramının burada da bize bir sürprizi var. Parçacık dünyasında zamanda geriye doğru hareket de mümkündür. Şekil 28'deki bir elektron ve bir pozitronun iki foton oluşturmak üzere yok oluşunu gösteren Feynman diyagramının tepkime denklemi şudur:

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$$

Diyagramda soldan gelen bir elektronla sağdan gelen bir pozitron birbirlerine yaklaşıyorlar. A noktasında gelen elektron yok oluyor ve bir foton ve elektron oluşuyor. B noktasında yeni oluşan elektron ve pozitron karşılaşıyorlar ve yok oluyorlar, böylelikle başka bir foton doğuyor. İlk olarak çizgilerdeki okları göz ardı edin ve zamanın geçişini taklit edecek şekilde yatay bir cetvelin yavaşça diyagramın altından üstüne doğru kaydığını hayal edin. Cetvel önce sol taraftan harekete geçen elektronla sağ taraftan hareketlenen pozitronun dünya çizgilerini kesecektir. Etkileşimlerden sonra cetvel şeklin üst tarafına doğru ilerlerken, uzağa uçuşan iki fotonun dünya çizgilerini keser. Kısa kesersek, öncesi ve sonrasını gösteren tepkime denklemi yukarıdadır.

John Wheeler (1911–2008), burada yirmi üç yaşında Kopenhag'da Niels Bohr'la beraber doktora sonrası araştırmacılık yaptığı sırada görüntülenmiş. 1939 yılında Bohr ve Wheeler nükleer bölünme üzerine olan ünlü çalışmalarını kaleme alacak ve çalışmaları Hitler'in ordusu Polonya'yı işgal ettiği gün yayımlanacaktır. Wheeler'ın özel yeteneği, hem tahtada genellikle iki elini de kullanarak yaptığı şekillerinde, hem de Planck uzunluğu, kuantum köpüğü ve kara delik gibi kelimeleri bizlere kazandıran kavram üretmesi becerisinde görülür. Wheeler'dan ders alma ayrıcalığına sahip olan bir ordu dolusu genç fizikçiden biri de bendim.

Ancak diyagramı yorumlamanın başka bir yolu daha vardır: Bir elektron A noktasında bir foton yayar, ondan sonra bir elektron B noktasına doğru hareket eder, ondan sonrasında da bir elektron zaman rotasını ters çevirir ve çizgisi aşağıya doğru ve B noktasından sağa doğru genişler. Üç fermiyon çizgisi, iki kez bükülen tek bir çizgi olarak da görülebilir. Şekildeki oklar bu bakış açısını yansıtmaktadır. Zamanda ileriye doğru hareket eden bir pozitron ile zamanda geriye doğru hareket eden bir elektronun aynı şeyler oldukları fikri, ilk kez, aynı zamanda Feynman'ın Princeton'daki danışmanı da olan John Wheeler tarafından geliştirilmiştir. Wheeler bu tezahür anını otobiyografisinde şöyle anlatır[59]: "[1940 veya 1941'de] Bir akşam Princeton'daki evimde otururken, bir pozitronun zamanda geriye doğru hareket eden bir elektron olarak yorumlanabileceği aklıma geldi. Bu fikirden öylesine heyecanlanmıştım ki, yüksekokul yerleşkesinde yaşayan yüksek lisans öğrencim

59 John Archibal Wheeler, *Geons, Black Holes, and Quantum Foam: A Life in Physics*, Kenneth Ford ile beraber (New York: W.W.Norton, 1998), s. 117.

Richard Feynman'a telefon etmeden duramadım. 'Dick' dedim, 'Tüm elektron ve tüm pozitronların neden aynı kütleye ve aynı yüke sahip olduğu biliyorum. Hepsi aynı parçacık!' " Feynman fikri beğendi. Parçacık dünya çizgilerinin aynı özellikleri taşıyarak zamanda ileri ve geri hareket etmeleri, Feynman'ın adını taşıyan diyagramların standart özelliğidir. Bu bakış açısı aynı zamanda maddi parçacıkların köşe etkileşim noktası için çok daha sade bir tanıma izin veriyor: Bir fermiyon çizgisinin bittiği noktada, başka bir fermiyon çizgisi başlar ve bir bozon çizgisi başlar veya sonlanır.

52. Feynman diyagramlarında yeğin, zayıf ve elektromanyetik etkileşimler nasıl gösterilir?

Şekil 26, 27 ve 28 elektromanyetik etkileşimi iş başındayken gösteriyor. Elektromanyetik kuvvetin taşıyıcısı fotondur. Onun yayınım ve soğurulmasını tetikleyense elektrik yüküdür. Dolayısıyla elektrik yükü taşıyan herhangi bir şey, örneğin bir elektron veya bir kuark elektromanyetik etkileşim geçirir. Yüksüz bir nesne, örneğin nötrino elektromanyetik etkileşim geçirmez. Elektromanyetik etkileşim, etkinlik açısından yeğin ve zayıf etkileşimlerin arasında yer alır (aslında zayıfa oranla yeğin etkileşime çok daha yakındır[60]).

Enrico Fermi 1934'te zayıf etkileşim kuramını ilk geliştirdiği zaman, dört uçlu bir etkileşim tasavvur etmişti. Bunun bir örneği nötronun radyoaktif bozunumudur, bir parçacık üç başka parçacığa dönüşür:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

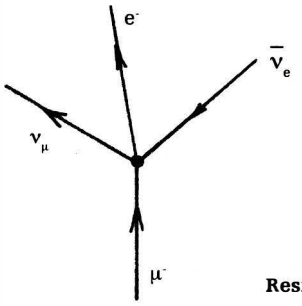
60 Şu anki "soğuk" evrenimizde, zayıf ve elektromanyetik etkileşimlerin kuvvet taşıyıcıları arasındaki kütle açısından büyük başkalık, bu iki etkileşimin çok farklı etkinliklere sahip olmasına neden olur (kuvvet taşıyıcısının kütlesi ne kadar büyükse, kuvvet o kadar zayıftır). Evrenin aşırı sıcak olduğu ilk zamanlar, Büyük Patlama'nın hemen sonrasında, kütle başkalığı çok az fark yaratıyordu; çünkü enerjinin çoğu kütle enerjisi değil, hareket enerjisiydi. Sonra iki etkileşim karşılaştırılabilir etkinlik düzeyinde oldu.

Her ne kadar bu bozunumdaki sonradan açıklığa kavuşturulacak olan ara süreci bilmiyor olsa da, Fermi bizlere, etkileşimlerin parçacıkların yok olma ve var olmasına yol açtığı yönündeki derin düşünceyi sunmayı başardı.

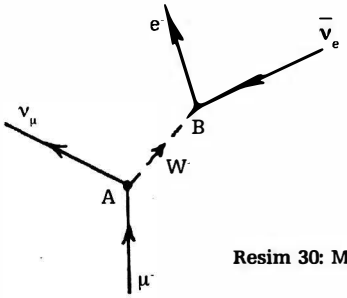
1940'larda, müonun "yavaşça" (iki mikro saniyede) bir elektron ile muhtemelen bir nötrino ve bir karşı nötrinoya bozunduğu keşfedildikten sonra, fizikçiler başka bir dört uçlu köşe noktasının işbaşında olduğunu düşündüler ve bir "Evrensel Fermi Etkileşimi"nden bahsetmeye başladılar. Müon bozunumu tepkime denklemi olarak şöyledir:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$$

Şekil 29 ve 30 bu sürecin en başta nasıl tasavvur edildiğini ve şimdi nasıl düşündüğümüzü göstermektedir. Zayıf etkileşimlere çok ağır W ve Z bozonları (büyük kütleleri zayıf etkileşimin zayıf olma nedeninin bir parçasıdır) aracılık etmektedir. Şekil 30'da bir negatif müon resmedilmiştir; ilk başta hareketsizdir (şekilde dikey çizgi), önce A noktasında bir müon nötri-



Resim 29: Müon bozunumunun ilk tasavvuru.



Resim 30: Müon bozunumunun şimdiki tasavvuru.

nosu ve bir W^- parçacığına dönüşür. Sonra B noktasında W^- bir elektron ve bir elektron karşı nötrinosuna dönüşür. Bu Feynman diyagramında sadece üç uçlu köşe noktaları görürsünüz, hiçbiri dört uçlu değildir. Dolayısıyla bu diyagramda her köşe noktasında bir içeri gelen, bir dışarı giden fermiyon ve bir bozonun olması kuralını çizili halde görebiliyorsunuz. (Ortaya çıkan elektron karşı nötrinosunun zamanda geriye doğru hareket eden bir nötrino olarak tanımlandığına dikkat ediniz.)

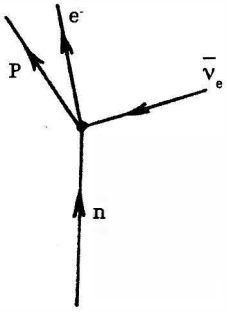
Bu süreçte W^- parçacığı kuvveti "taşımaktadır", ancak bu parçacık "dış dünyada" hiçbir yerde görülemez (örneğin yukarıdaki tepkime denkleminde de W^- açıkça görünmez). Çok küçük bir uzam içerisinde ve ölçülemeyecek derecede kısa bir zamanda yaratılır ve yok edilir. Bu bir *sanal parçacık*tır, birdenbire var ve yok olur. Etkileri yeterince gerçektir ve oynadığı role dair de bir kuşku yoktur; ancak bu süreçte dikkatinizden kaçar. Enerji korunumunu düşünürseniz, süreçte yer alabildiğine bile şaşırırsınız. Ulaşılabilir toplam enerji sadece müonun kütle enerjisidir, bir W^- parçacığı yaratmak için gerekenden çok daha azdır. Ancak sanal parçacıkların doğası budur. Heisenberg'in belirsizlik ilkesi (*bkz.* Soru 42 ve 74), yeterince kısa zamanda olup biten süreçlerde enerji korunumunun geçici ihlaline izin verir. Kuantum fiziğinin bir diğer tuhaflığı daha...

Gerçek W parçacıklarının, sanal parçacıklardan farklı olarak, laboratuarda oluşturularak üzerinde çalışılabildiğini eklemeliyim. Büyük hızlandırıcılarda ulaşılabilen yüksek enerji düzeylerinde gerçekleştirilen parçacık çarpıştırmaları sonucunda ortaya çıkarlar.

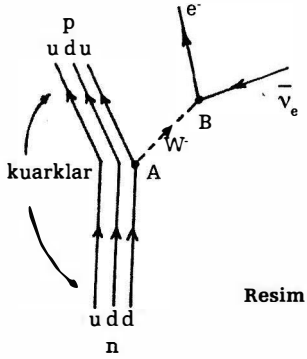
Şekil 31 ve 32 nötron bozunumu hakkındaki düşünüşün evrimini gösteriyor; müon bozunumuna göre daha dramatik bir bakış değişikliği sözkonusu. Şekil 32 nötron bozunumunun orijinal dört-uçlu biçimini gösteriyor, tepkime denklemi de aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Karşı nötrinonun elektron tipinde olduğunu gösteren "e" alt simgesinin şimdi eklenmiş olmasını hariç tutarsak, bu Soru 36'da verilen denklemin aynısı.



Resim 31: Nötron bozunumunun ilk tasavvuru.



Resim 32: Nötron bozunumunun yeni görünüşü.

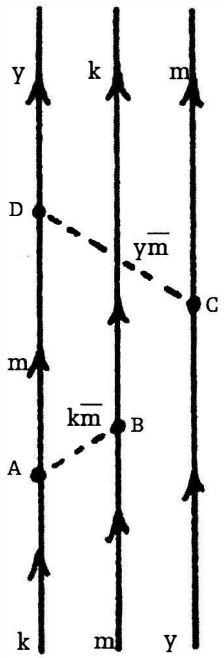
Şekil 32 bir dizi incelik içeriyor. Birincisi, nötron ve protonun kuark bileşenleri gösterilmiş. Bunlar sırasıyla yukarı-aşağı-aşağı (udd) ve yukarı-yukarı-aşağı (uud). İkinci olarak bozunumun, aşağı kuarklardan biri, bir yukarı kuark ve bir W^- parçacığına dönüştüğünde gerçekleştiği gösterilmiş. Üçüncü olarak W^- parçacığı, müon bozunumunda olduğu gibi, sadece geçici olarak bir varlığa sahip olan sanal bir parçacık. Yine burada da ulaşılabilen enerji, gerçek bir W^- parçacığı oluşturmak için gerekenin çok uzağında. Bu şekilde, Şekil 30'da olduğu gibi, A ve B noktaları zayıf-etkileşim köşe noktaları ve bu noktalarda zayıf kuvvet taşıyıcısı olan W^- parçacığı var olduğu gibi hızlıca yok oluyor.

Yeğin etkileşimde kuvvet taşıyıcıları, gluonlardır. Elektromanyetik etkileşimin sadece bir kuvvet taşıyıcısı olduğunu (foton); zayıf etkileşimin iki kuvvet taşıyıcısı olduğunu (W ve Z parçacıkları); yeğin etkileşimin ise gluonlar şahsında sekiz

kuvvet taşıyıcısı olduğunu vurgulayalım. Gluonlar *kırmızı-karşı mavi, mavi-karşı yeşil* vs gibi[61] beceriksizce isimlendirmelere sahiptirler. Bir gluon yayınlandığında veya soğurulduğunda yaptığı, belli bir renkteki kuarkı başka renkteki bir kuarka çevirmektir. Şekil 33, henüz "hareketsiz duran" bir nükleonun Feynman diyagramını göstermektedir. Gluon değiş tokuşundan dolayı kuarklar sürekli renk değiştirirler; ancak üç tanesi yukarı-aşağı tanımları değişmeden kalır. Her köşe noktasının genel kurallarla uyumlu olarak, bir fermiyonun yok olduğu, birinin var olduğu ve bir bozonun yok veya var olduğu bir nokta olduğuna dikkat ediniz. Hareketsiz bir nükleon canlı bir yerdir.

Kuram, yeteri derecede yüksek enerjide Şekil 33'teki resmin *kuark-gluon plazması* dediğimiz bir kuark ve gluon girdabına dönüştüğünü söylemektedir (*bkz.* Soru 92).

Bu yanıtta kütleçekim etkileşimini atladım. Ona da diğer üç etkileşim gibi ilkesel biçimde, bir bozon tarafından, aracılık edilir. Kütleçekim kuvvetinin kuantum taşıyıcısına *graviton* adı verilir. Graviton da foton gibi kütlesizdir; ancak fotonun 1 biriminden farklı olarak, onun 2 birim spini vardır. Kütleçekimin aşırı zayıf olmasından dolayı, şu ana dek gravitonun varlığı kanıtlanabilmiş değildir. Teorik bir varlık olarak kalmıştır. Gravitonlar öyle kalabalık sayılarda beraber hareket halindedirler ki, bir veya birkaçının varlığını kanıtlama yönünde umut pek azdır.



Resim 33: Birbirleriyle gluon alışverişi yapan kuarklar

"Renkli Kuarklar"

61 Soru 46'da belirttiğimiz gibi üç renkten kaç tane renk-karşı renk kombinasyonu elde edebileceğinizi hesaplarsanız, dokuz sayısına ulaşırsınız. Teknik matematiksel nedenlerle sadece sekiz tanesi bağımsızdır.

53. Hangi parçacıklar kararlıdır? Hangileri kararsızdır? Bir parçacığın bozunduğunu söylemek ne anlama gelmektedir?

Tüm parçacıkların kararsız (veya aynı şey olan radyoaktif) olduğunu söylemek, kötü bir yakınsama olmaz. Her parçacık buna engel oluşturan bir şey yoksa kendisinden daha hafif parçacıklara (enerjide tepe aşağı) bozunacaktır. Bugüne dek edindiğimiz bilgilere göre, bunu ancak iki korunum yasası (istikrar yasası) engelleyebilir: kuark sayısının korunumu yasası ve yükün korunumu yasası. Bu iki yasa olmasaydı, evrendeki tüm parçacıklar bir foton ve nötrino (ve belki de graviton) denizinin içine çözünürlerdi. Bu konuyla ilgilenen bu kadar çok bilim insanı da olmazdı.

Kuark sayısının korunumu yasasından baryon sayısının da korunduğu ortaya çıkar. O halde, protonun istikrarı baryon korunumuna atfedilebilir; çünkü proton en düşük kütleli baryondur. Bozunamaz, çünkü bozunabileceği kendisinden daha düşük kütleli bir baryon yoktur. Her ne kadar bilimde bir şeye mutlak demek tehlikeliyse de, bu bir mutlak korunum yasası gibi görünüyor. Aslında protonun *bozunabileceğini* savunan bazı kuramlar da vardır. Bozunabilse, ortalama ömrü hayal edilemeyecek derecede uzun olurdu. Bunun 2×10^{29} yıldan daha fazla (veya olası bazı bozunumlarda 10^{32}'den daha fazla) olması gerektiği hesaplanıyor. Evrenin yaşının (Büyük Patlama'dan bu yana) sadece $1{,}4 \times 10^{10}$ yıl olduğu düşünülürse, bahsettiğimiz ortalama ömrün alt sınırı bile, evrenden 10 milyar çarpı milyar kere daha büyük oluyor. Bu durumda, proton kararsız olsaydı, yarı ömrünü ölçmek mümkün olmayacaktı diye düşünülebilir. Kuantum fiziğinde olasılığın tuttuğu rolden kaynaklı, bu düşüncenin doğru olması şart değil. Varsayalım ki, protonun yarı ömrü 10^{30} yıl olsun. Bir madde parçasındaki protonların yarısı, bundan daha uzun yaşayacaklardır (evren bu kadar uzun yaşarsa tabii!). Ancak bazıları şans eseri daha erken bozunacaktır, çok daha azı ise *çok daha* erken bozunacaktır. Yılda ortalama bir bozunumu güvence altına almak için ne kadar maddeye gereksinim duyarsınız? Yaklaşık üç ton yeterli olmalı.[62]

62 Bu gereklilik hesaplaması, çekirdekler içindeki bağlı nötronların

Yük korunumu yasasının yaptığı ise elektronu istikrara kavuşturmaktır; çünkü elektron en az kütle yüklü parçacıktır. Bozunuyor olsaydı, bu bozunum yüksüz parçacıklara olurdu. Yük korunumu yasasının, baryon korunumu yasası gibi, mutlak veya buna çok yakın olduğu gözüküyor. Elektronun ortalama ömrünün tespit edilen son alt limiti $5x10^{26}$ yıldır; bu proton ömrünün alt sınırı kadar uzun olmasa da, yine de *çok* uzundur. Elektronun ömrü bu olsaydı, ortalama olarak elektron bozunumunu yılda bir kilogram civarı bir malzemede tespit etmeyi bekleyebilirdiniz.

Proton ve elektronun ortalama ömrüne dair bu alt limitler, nadir gerçekleşen bozunum gözlemlerine dayanmamaktadır. Daha çok herhangi bir bozunum olayı *görmemiş* olmaya dayanmaktadır.

Parçacık bozunumlarında hüküm süren bir diğer yasak da, tekil bir parçacığa bozunumun mümkün olmamasıdır. Bu yüzden bir müon sadece bir elektrona bozunamaz, bir lambda sadece bir nötrona bozunamaz; bu bozunumlar enerji, yük ve baryon sayısı korunumuna uygun olsa da mümkün olmaz. Bir parçacığa bozunmaya engel oluşturan, momentumun korunumudur. Kütle ve hız tarafından belirlenen bir hareket özelliği olarak momentum, bozunum olayının öncesinde ve sonrasında aynı olmalıdır. Dolayısıyla hareketsiz bir lambda sadece bir nötrona bozunacaksa, nötronun da hareketsiz kalması gerekir (sıfır momentum önce=sıfır momentum sonra). Ancak bu durumda enerji korunmuş olmaz; çünkü nötronun kütlesi lambdanın kütlesinden azdır. Bu varsayımsal tek-parçacığa bozunumda enerji *korunuyorsa*, ortaya çıkan nötron belli bir hareket enerjisi ile uçar giderdi; ancak bu durumda olay öncesi olmayan bir momentum olay sonrası var olmuş olurdu. Sonuç olarak, tek-parçacığa bozunum olmaz. (Bir fizik öğrencisi, bu yasanın ilk parçacık hareket ediyor olsa da işlediğini gösterebilir.) Dolayısıyla pratikte her kararsız parçacık iki veya daha fazla parçacığa bozunur. Bir önceki bölümde verdiğimiz Feynman diyagramları da bu yasaya uygundur.

---

protonlarla aynı oranda bozunduğunu varsaymaktadır.

54. Saçılım nedir?

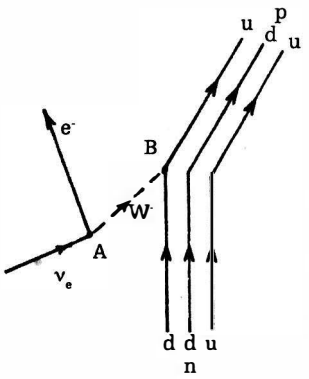
Bozunum, bir parçacığın başına gelebilecek olan ve genellikle de başına gelendir. Bu parçacığın başka bir şeyle etkileşiyor gibi görünmediği durumlarda dahi, aslında bozunum etkileşim tarafından, genellikle de zayıf veya elektromanyetik etkileşim tarafından meydana getirilir.

Bozunumun saçılımdan ayırt edilmesi gerekir. İki parçacık çarpıştığında birbirlerinden sekebilirler ya da başka parçacıklar ortaya çıkarken kendileri yok olabilirler. Böylesi süreçler daha açık biçimde etkileşimin sonucudurlar ve en son parçacıkların ilk parçacıklarla aynı veya onlardan farklı olmasına göre *saçılım* olarak adlandırılırlar. Doğrusunu söylemek gerekirse, saçılım sonucu ortaya çıkan parçacıklar, aynı olsalar bile, *her zaman* farklıdırlar (Lütfen, bu ifadenin Alice Harikalar Diyarında niteliğini affediniz). Örneğin Şekil 26'da iki elektron bir araya gelmekte ve iki elektron uçuşup uzaklaşmaktadır. Ancak A köşe noktasında (aynı zamanda B'de de), kuantum kuramı matematiğine göre gerçekleşen, bir elektronun ortadan kalkması ve bir elektronun yaratılmasıdır. Ortadan kaybolan elektronun ortaya çıkan elektronla aynı olduğunu söylemek anlamsızdır, ancak kesin olarak farklı olduklarını söylemek *de* anlamsızdır. Tüm söyleyeceğimiz bunların elektronlar ve tüm elektronların özdeş olduğudur. O zaman başımız dönmeden bu durumu nasıl yorumlamamız gerekiyor? Matematiğe en uygun düşen yaklaşım, yeni oluşan elektronun yok olandan ayrı olduğunu kabul etmektir.

Verdiğimiz tanımlara göre Şekil 28'de bir saçılım sürecini gösteriyor. Bir elektron ve bir pozitronun çarpıştığını, yok olduklarını ve iki fotonun ortaya çıktığını görüyoruz. Saçılıma, bu kez kuarkların dâhil edildiği, bir örnek Şekil 34'de görülmektedir. Bir elektron nötrinosu bir nötronla çarpışıyor, sonucunda bir elektron ve bir proton oluşuyor:

$$\nu_e + n \rightarrow e^- + p$$

Bu SNO'da, Kanada'daki Sudbury Nötrino Gözlemevi'nde gözlemlenen bir süreç (Soru 41'de *bkz.*). Denkleme dâhil olan



Resim 34: (Muhtemelen güneş kaynaklı) bir nötrino bir nötronla etkileşerek bir elektron ve bir proton oluşturuyor; Sudbury Nötrino Gözlemevi'nde gözlemlenen bir süreç.

nötrino Güneş'ten geliyor. Vurulan nötron bir döteron içerisinde tutulmuş, bir diğer deyişle sabitleştirilmiş (tekil nötronlar laboratuarda tutulamazlar, bozunurlar). Dolayısıyla aslında bir nötrino bir döterona çarptırılmış, bir elektron ve iki proton elde edilmiş. Ancak protonlardan biri "seyircidir", dolayısıyla onu diyagramın dışında bıraktık. Şekil 34'de gösterildiği gibi, bir W^+ parçacığı aracı "kuvvet taşıyıcısı" olarak işlev görmektedir. Oluşturulduğu A noktasında, bir nötrino yok olmakta ve bir elektron oluşmaktadır. W^+ parçacığının yok olduğu B noktasında, bir aşağı kuark bir yukarı kuarka dönüşmekte veya bir yukarı kuarkla yer değiştirmektedir.

55. Bir saçılım veya bir bozunumun öncesi ve sonrasında aynı kalan nedir?

Bir parçacık sürecinden sonra öncesiyle aynı olan niceliğe *korunmuş* nicelik, bu niceliğin değişmezliğini belirten yasaya ise *korunum yasası* denir. Bunların birkaçıyla şimdiden karşılaştınız. Az sayıda korunum yasası vardır; bunların bazıları görünüşe göre mutlak, diğer bir deyişle herhangi bir süreç ve tüm süreçler için geçerli, bazıları ise *kısmi* dediğimiz niteliktedir. Kısmi bir korunum yasası, tümü için değil bazı etkileşimler için geçerlidir. Parçacık süreçlerinin ve hatta büyük ölçekli süreçlerin temelinde işleyen korunum yasaları X. Bölüm'ün temel konusu olacak. Burada bu bölümdeki Feynman diyagramlarında karşımıza çıkmış olan korunmuş niceliklerin bazılarına dikkat çekeceğim.

Enerjinin korunumu mutlak olanlardan biridir. Bozunum süreçlerinin neden kütle açısından her zaman "tepe aşağı" işlediğini ve yeni bir kütle oluşturmak için çarpışmalarda neden bu kadar çok hareket enerjisinin gerekli olduğunu açıklar. Bir parçacığın bir başka tekil parçacığa neden bozunamayacağını açıklayan momentumun korunumundan da bahsetmiştim.

Üçüncü bir "mekanik" korunum yasası, açısal momentum veya spinin korunumudur. Bunun sonuçlarından biri olarak; bir sistem bir etkileşim öncesi tek tamsayının yarısı spine sahipse, etkileşimden sonra da tek tamsayının yarısı spine sahip olur. Benzer şekilde, tamsayı spin de öncesi ve sonrasında korunur. Bu kurallar Şekil 30'da müonun bozunumunda ve Şekil 28'de bir elektron ve pozitronun yok oluşunda gösterilmiştir. Spin bir vektörel nicelik olduğu için, saymaktan biraz daha fazlasını yapmamız gerekir. Örneğin müon bozunumunda 1/2 spinli bir parçacık, her biri 1/2 spine sahip üç parçacığın ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Son üç parçacığın ikisinin spinlerinin zıt yönlerde olduğunu ve böylece bunların birbirlerini götürerek toplam son spinin 1/2 olduğunu düşünmeniz gerekir. Benzer şekilde, elektron-pozitron yokoluşunda, bir olasılık toplam spinin sıfır olması için ilk iki parçacığın zıt yönlü spinlere sahip olmasıdır. Dolayısıyla ortaya çıkan her biri 1 spinli iki fotonun da zıt yönlü spinleri olmalı ki, toplam sıfır olsun.

Yük, lepton sayısı ve baryon sayısı gibi "içkin" özelliklerin korunumu, diyagramlarda daha açık olarak görülmektedir. 26'dan 34'e şekilleri incelediğinizde, yük, lepton sayısı ve baryon sayısının (bir kuarkın baryon sayısı 1/3'tür) sadece etkileşim öncesi ve sonrasında değil, ayrı ayrı olarak her etkileşim köşe noktasında da korunduğunu göreceksiniz. Daha önce bir köşe noktasında hiçbir şeyin korunmadığını söylemiştim. Hiçbir *parçacığın* korunmadığını söylemem gerekirdi. Köşe noktasında parçacıklar var ve yok olurlar, ancak parçacıkların belirli bazı özellikleri kaybolmaz. Elektrik yük veya lepton çeşnisi, bir bayrak koşusundaki bayrağa benzerler. Bir koşucu "ortadan kaybolur", başka bir koşucu "ortaya çıkar", ancak bayrak "etkileşim" noktasında görünerek elden ele geçer.

Şekil 33, başka bir korunum yasasının, renk korunumunun işleyişini göstermektedir. Örneğin A noktasında bir kırmızı kuark ortadan kaybolur, bir mavi kuarka yolu açar, ancak aynı zamanda bir kırmızı-karşı mavi gluon ortaya çıkar. Dolayısıyla bu etkileşim noktasında bir birim "kırmızılık" öncesinden sonrasına korunmuştur; ayrıca sıfır birim "mavilik" de korunmuştur, çünkü mavi ve karşı mavi beraber sıfır "mavilik" ederler, tıpkı bir elektron ve bir pozitronun beraberce (bir lepton ve bir karşı lepton) sıfır lepton sayısına sahip olmasında olduğu gibi... Benzer biçimde C noktasında öncesi ve sonrasında 1 birim "yeşillik" ve sıfır birim "mavilik" vardır. İsimlendirme gerçekten berbat; ancak fizikçilerin anlaşabildiği en iyi çözüm bu olmuş, yapacak bir şey yok.[63]

56. Bir saçılım veya bozunum sırasında ne değişir?

Kısa yanıt korunmayan her şeyin, örneğin kütlenin, değişebileceğidir. Kütle enerjisi dâhil olmak üzere toplam enerji değişmez; ancak kütle, bozunum olaylarında gerçekleştiği üzere azalabilir veya saçılım olaylarında sıkça olduğu üzere çoğalabilir. Değişebilen başka bir şey de bozonların sayısıdır. Bir elektron ve pozitron iki foton oluşturmak üzere yok olduklarında örneğin, süreç öncesinde bozon sayısı sıfırken süreç sonrasında ikidir (Şekil 28'e *bkz.*). Belirli bir tipteki, örneğin negatif müonlar veya aşağı kuarklar gibi, parçacıkların sayısı değişebilir. Örnek olarak Şekil 30'da bir negatif müonun etkileşimden sonra hayatta kalamadığını, ancak yine de müon *çeşnisindeki* parçacık sayısının korunduğunu, çünkü müonun yerini müon nötrinoya bıraktığını görüyoruz. Nötron bozunumunun gösterildiği Şekil 32'de yukarı kuarkların sayısı değişiyor, aşağı kuarkların sayısı değişiyor; ancak kuarkların toplam sayısı değişmiyor.

Etkileşimlerde pek az şeyin değişebilmesi gerçeğine rağmen, yine de korunum yasaları olabilecekleri sınırlamada güçlü bir etkide bulunuyorlar. Bu bir sonraki bölümde daha açık görülecek.

63 Bazı Amerikalı fizikçilerin kuark ve gluon renklerinin kırmızı, beyaz ve mavi olmasını istediği; ancak kırmızı, yeşil ve mavi üzerinde oluşan uluslararası uzlaşmaya uymak zorunda kaldıkları söylenir.

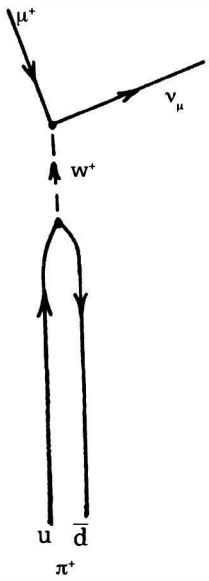
X. Bölüm

Değişimdeki Sabitlik

57. Mutlak korunum yasalarının "dört büyükleri" kimler?

Sizi çevreleyen dünyada statik olan bir şey yok gibidir. Bulutlar hareket eder, yapraklar dalgalanır, siz bir yerden diğerine gidersiniz. Euripides'in milattan önce beşinci yüzyılda dediği gibi "her şey değişir". Bu düşünceyi kabul etmek zor değildir. Zaten Euripides'ten bu yana geçen yirmi beş yüzyıl boyunca, bilimcilerin çoğunun doğa yaklaşımlarının odağında değişim yer almıştır. Newton'un on yedinci yüzyılda şeylerin kuvvetlere cevaben nasıl hareket ettikleri üzerine çalışırken odak noktası da buydu. On dokuzuncu yüzyılda Maxwell, elektrik yük salınımı yoluyla radyo dalgalarının yayınımı üzerinde çalışırken, onun odak noktası da aynısı oldu.

Ancak tüm değişimin ortasında, *bazı* şeyler sabit kalır. Bunlar korunan niceliklerdir. Bugün büyük ölçekli dünyada ("klasik" dünyada) sabit olduğu bilinen şeylerin, kuantum dün-



Resim 35: Bu pion bozunumu örneğinde çok sayıda nicelik korunmaktadır.

yasında da (aslında parçacık etkileşiminin bireysel eylemleri düzeyine doğru inerek) sabit kaldıklarını biliyoruz. Yükün büyük ölçekli dünyada korunmasının *gerekçesi*, onun parçacık oluşumu ve yok oluşunun tüm durumlarında korunuyor olmasıdır. Enerjinin büyük ölçekli dünyada korunmasının *gerekçesi*, onun kuantum dünyasında korunuyor olmasıdır. Buradan düşündüğünüzde büyük ve küçük ölçekli dünyalar arasında bir sıkı bağın var olması *gerektiği* açıkça görülmez. Örneğin iyi huylu bir büyükannenin kurabiye kabında daima tam yüz kurabiye bulundurduğunu varsayın. Torunları her ziyarete geldiğinde kapta aynı sayıda kurabiye vardır. Alındıkları gibi yerlerine yenileri aynı hızla konur. Ancak bu özel kurabiye korunum yasası, bireysel kurabiyelerin korunmasından kaynaklanmaz. Kurabiye korunumu büyük ölçekli dünyada bir yasa olabilir, ancak küçük ölçekli de bir yasa değildir.

Öte yandan klasik olarak korunan niceliklerin "dört büyükleri" (enerji, momentum, açısal momentum ve elektrik yükü) sözkonusu olduğunda, korunum yasalarının yerin ve zamanın en küçük alanlarına dek geçerli olduğuna ve tüm ölçeklerde bu yasaların mutlak olduğuna inanmaktayız (O derece ki, evrendeki herhangi bir şeye mutlaktır demeye cesaret etmekteyiz).

Dört korunum yasasını birden (aslında daha fazlasını) işbaşında gösteren basit bir örnek, pozitif yüklü bir pionun pozitif yüklü bir müon (aslında bir karşı müondur) ve müon çeşnisinden bir nötrinoya bozunumudur (*bkz.* Şekil 35):

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

Enerji korunumu, bozunumun "tepe aşağı" karakterinde yansımasını bulmuştur. Ortaya çıkan parçacıkların kütlelerinin toplamı pionun kütlesinden azdır, dolayısıyla kütle enerjisi azalmıştır. Müon ve nötrino sonrasında yeterli hareket enerjisi ile uçup giderler ve böylelikle enerji toplamı tutturulur. *Momentumun korunumu*, ortaya çıkan parçacıkların *nasıl* uçup gittiklerinde yansımasını bulur. Pionun önce hareketsiz, sabırla kaçınılmaz sonunu bekliyor olduğunu varsayın. O durumda momentumu sıfırdır. Öyleyse müon ve nötrinonun toplam momentumu da sıfır olmak zorundadır. Bu iki parçacık sırt sırta aynı momentumla uçuşurlar. Vektörlerin toplanması kuralı uyarınca, iki zıt yönlü momentumun toplamı sıfır eder. *Açısal momentumun korunması*nda da vektör toplaması vardır (açısal momentum da, bildiğimiz momentum gibi vektörsel bir niceliktir). Pionun spini sıfırdır. Müon ve nötrinonun her birinin 1/2 spini vardır, bu da zıt yönlü olurlarsa toplamda sıfır edebilir demektir. *Yükün korunumu* tepkime denkleminde açıkça görülür. Toplam yük bozunumun öncesinde de, sonrasında da 1 birimdir.

Kitapta daha önce verilmiş tepkime denklemlerine bakarak bunların dört büyük korunum yasasıyla uyumlu olup olmadıklarını kendiniz görebilirsiniz.

58. Kuantum dünyasında başka hangi mutlak korunum yasaları geçerlidir?

Varlıkları sadece atom-altı alanda tespit edilmiş olan ve aynı zamanda mutlak oldukları düşünülen başka üç korunum yasasının yanında bir de simetri ilkesi vardır. Tablo 1'de dört büyükle beraber listelenmişlerdir. Yeni korunum yasalarının ikisi aslında yukarıda örnek verdiğimiz pion bozunumunda yer almaktadır. Bu bozunumda lepton çeşnisi korunmuştur, çünkü bozunumun hem öncesinde hem de sonrasında sıfırdır. Öncesinde sıfırdır, çünkü o esnada sadece pion vardır, hiç lepton yoktur. Sonrasında da sıfırdır, çünkü müon çeşnisinden bir lepton ve aynı çeşniden bir karşı lepton ortaya çıkmıştır. (Bu durumda lepton olanın nötrino olduğuna, karşı lepton olanınsa pozitif müon olduğuna dikkat ediniz.) Öte yandan bir negatif pion bozunuma uğradığında, ortaya çıkan ürünler bir

negatif müon ve müon çeşnisinden bir karşı nötrinodur. Negatif leptonlara *parçacıklar*, pozitif leptonlara *karşı parçacıklar* denmesi ise sadece adet olduğundandır. Bu tercih, dünyamızda elektronların pozitronlar üzerinde bariz bir üstünlük kurmasından kaynaklanmaktadır. Ters yönde bir seçim yapılmış olsaydı da, fiziksel hesaplama aynı olurdu.

Tablo 1 Mutlak Olarak Korunduğuna İnanılan Nicelikler

Enerji	Lepton çeşnisi[64] (lepton sayısına işaret eder)
Momentum	Kuark sayısı (baryon sayısına işaret eder)
Açısal momentum	Renk
Yük	TCP (bir değişmezlik ilkesi)

Pion bozunumunda kuark sayısının korunumu da sergilenmektedir. Pozitif pionun yapısında bir yukarı kuark ve bir karşı-aşağı kuark bulunur. Parçacık sayılarını hesaplamanın olağan kuralları uyarınca bu toplamda sıfır kuark sayısı eder. Bozunumdan sonra kuark yoktur, dolayısıyla sayı sıfır kalır.

Tabloda yeni listelenmiş üçüncü mutlak korunum yasası olan *renk*, sadece kuarklar ve gluonlarda bulunan bir özelliktir. Rengi gözümüzde elektrik yüküne benzer bir şey olarak canlandırabiliriz ve gerçekten de kimilerince *renk yükü* olarak da adlandırılmaktadır. Bir parçacık tarafından taşınan ve parçacık etkileşime girdiğinde devredilen "belli bir şeydir". Daha önce bahsettiğim gibi, var olan üç renk geleneksel olarak *kırmızı*, *yeşil* ve *mavi* olarak adlandırılmaktadır. Kuarklar renk taşır, karşı kuarklar karşı renk taşır, gluonlarsa renk ve karşı rengin karışımını taşırlar. Bir varlığın renksiz olmasının birkaç yolu vardır. Bir elektron veya bir nötrinoda olduğu gibi, kuark veya gluona hiç sahip olmuyor olabilir. Veya bir rengin ve karşı renginin, kırmızı ve karşı kırmızı gibi eşit karışımına sahip olabi-

64 Lepton çeşnisi "neredeyse" mutlak olarak korunur; görünüşe bakılırsa nötrino salınımı *hariç* her durumda.

lir. Verdiğimiz pozitif pion örneği kırmızı-karşı kırmızı, yeşil-karşı yeşil ve mavi-karşı mavi kuarklarının bir birleşimidir (üst üste düşme) ve sonuç olarak renksizdir. Ve son olarak, hiç karşı renk olmadan, üç rengin eşit bir karışımı da renksiz yapabilir. Bunu aklınızda tutmak için, her ne kadar renk karışımının bu iki çeşidi arasında hiçbir bağ yoksa da, gökkuşağındaki renklerin eşit karışımının beyaz ışık sonucunu verdiğini hatırlamanız faydalı olur. 52'inci sorudaki 33'üncü şekil, bir nükleondaki üç kuarkın renksiz birleşimini göstermektedir. Şekilde zamanı yukarı tarafa doğru ilerleyen şekilde düşünürseniz, şeklin alt tarafına yatay olarak bir cetvel koyarak bunu yukarıya doğru yavaşça kaydırır (tüm bu esnada yatay olarak tutarak) zamanın akışını gözünüzde canlandırabilirsiniz. Her bir anda sol, orta ve sağ kuarkların farklı renkleri olduğunu, dolayısıyla kırmızı-yeşil-mavinin renksiz birleşiminin kuark-gluon dansı boyunca anbean korunduğunu görürsünüz.

Tablodaki yeni mutlaklar listesinin sonuncusu *TCP teoremi* adı verilen bir simetri ilkesidir. Korunum yasaları ile birlikte listelenmiştir, çünkü o da bizlere doğada ne olabileceğine dair kuvvetli yasa sunmaktadır.

59. TCP teoremi nedir?

T, C ve P harflerinin her biri (gerçek veya varsayımsal) bir ters çevirme biçimini imlemektedir. Bu ters çevirmelerin anlamları kısaca:

T, (time) zamanı tersine çevirme: Deneyi geriye doğru yap, bir diğer deyişle öncesi ve sonrasını değiştir.
C, (charge) yük eşleneği: Deneydeki tüm parçacıkların yerine karşı parçacıklarını ve tüm karşı parçacıkların yerine parçacıklarını koy.
P, (parity) parite veya ayna görüntüsü: Deneyi orijinal deneyin aynadaki görünümüne göre yap.

"TCP teoremine" göre; bu ters çevirmelerin üçü birden gerçekleşen herhangi bir sürece uygulanabiliyorsa, üç kere ters çevrilmiş süreç de -tüm parçacıklarda- gerçekleşebilir.

1956'ya dek fizikçiler (sonradan ortaya çıktığı üzere sağlam kanıtlara sahip olmaksızın doğan bir inançtı bu ve ben de inananlardan biriydim) T değişmezliği, C değişmezliği ve P değişmezliğinin birbirlerinden ayrı olarak geçerli yasalar oldukları na inanıyorlardı. Oysa bunların kısmi korunum yasaları olduğu ortaya çıktı. Sözkonusu "kısmiliklerini" bir sonraki soruda tartışacağım. İzninizle burada bu üç ters çevirmenin doğası hakkında biraz daha derinleşelim ve mutlak bir yasa katına çıkmak üzere nasıl birleştiklerinin sırrını keşfe çalışalım.

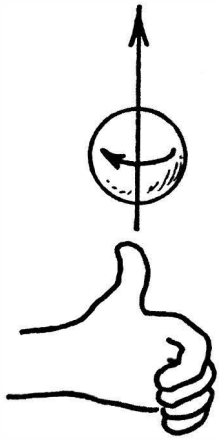
T: Zamanda ters çevrilmiş bir süreci gözünüzde canlandırmak için Soru 57'deki pozitif pion bozunumu üzerine olan tepkime reaksiyonuna bakarak bunu sağdan başlayıp sola doğru okuyunuz. Bir pozitif müon ve bir müon nötrinosu çarpışarak bir pozitif pion oluşturmaktadırlar. Veya Soru 51'deki Şekil 28'e gidelim ve Feynman diyagramını yukarıdan aşağıya doğru okuyalım: İki foton çarpışmakta, bir elektron ve bir pozitron oluşturmaktadırlar (bunların her ikisi de olmaması yüksek olasılık olan, ancak olanaksız da olmayan süreçlerdir). Büyük ölçekli dünyada zamanda ters çevrilmiş bir süreç, bir video veya filmi geriye sararken gördüğünüz şeydir. Deneyimimizle bildiğimiz dünyamızda, işin içine karışan parçacıkların astronomik büyüklükteki sayısı yüzünden, zamanda ters çevrilmiş süreçler genellikle olanaksızdır (düşüncesi de saçma karşılanır). Bir nehre karışmak üzere çimenlerin üzerinde biriken su damlalarının, bir hortumdan akmak üzere geriye doğru döndüklerini düşünün. Veya kazaya uğramış arabaların kırık dökük parçalarının tekrar kendilerini toplayarak kazadan önceki sahneden uzağa, parlak araçlar haline geri döndüklerini gözünüzün önüne getirin. Öte yandan büyük ölçekli dünyadaki kimi süreçlerde de, orijinal süreç ile zamanda ters çevrilmiş görüntüsü arasındaki farkı söylemek oldukça güçtür. Üçüncü alandan birinciye doğru yol alan bir beyzbol topunda veya dünya etrafında dönen bir uyduda olduğu gibi...

C: Örnek verdiğimiz pion bozunumundan devam edersek, yük eşleneğinin veya parçacık-karşı parçacık değişiminin sonucunu orada da kolaylıkla görebilirsiniz. C-ters çevirme süreci (bir pozitif pionun karşı parçacığı olan) negatif bir pio-

nun, bir müon ve bir müon karşı nötrinosuna olan bozunumudur:

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

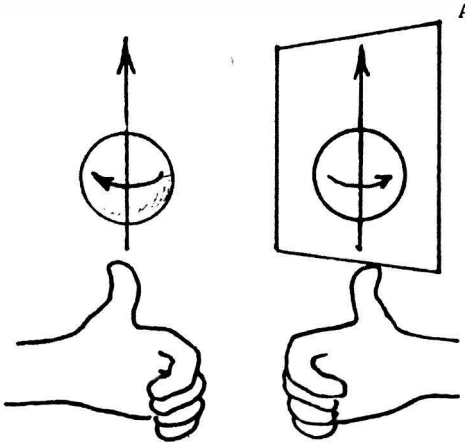
Gerçekte bir negatif pion bu şekilde bozunur. *Ancak* (burada fizikçilerin karşısına C değişmezliğinin tek başına geçerliliğine duydukları inancı sarsan bir büyük sürpriz çıkmıştı) bozunumlar her parçacıkta birbirlerini, C değişmezliğinin iddia ettiği gibi, kopyalamamaktadırlar. Bunun gerekçesi nötrinonun "sol elli", karşı nötrinonun "sağ elli" olmasıdır. Şekil 36 sol elle ne kastedildiğini göstermektedir. Sol elin başparmağı nötrinonun hareketinin yönünü tarif ediyorsa, sol eldeki bükülü parmaklar nötrinonun spin yönünü gösterir. C-ters çevirmeyi pozitif pion bozunumuna uygulamak, aslında bizleri olanaksız olan bir sürece-bir negatif pionun bir müon ve bir sol elli karşı nötrinoya bozunumuna sürüklemektir.



Resim 36: Nötrino sol elli bir parçacıktır.

P: Parite değişimi, bir sürecin aynadaki görüntüsüne bakmakla aynıdır. Bu kitabın herhangi bir sayfasını aynaya tutarsanız, okunması zor olan bir geriye doğru ters yazımla karşılaşırsınız. Yine de gördüğünüzün ulaşılması (düzeltilmesi) imkânsız olan bir durum olmadığını bilirsiniz. Kitap ters yazılmış olsaydı (ambülânsların çoğunun önünde yapıldığı gibi), bu kez aynada yazı normal gözükürdü. Belki çocukken siz de "ayna yazımı" yaparak, ailenizdekilerin yazdıklarınızı sadece aynaya tutarak okumalarını sağlamışsınızdır. Öte yandan bazı parçacıklar için ayna görünüşü, mümkün olabilecek bir görünüm değildir. Sol elli bir nötrinonun ayna görünümü, sağ elli bir nötrinodur ve sağ elli nötrino yoktur (Şekil 37).

Son olarak şimdi üç ters çevirmeyi, nötrinonun sol elli spini belirtmek üzere L (left-sol) alt simgesini eklediğimiz, pozitif pion bozunumuna uygulayalım:



Şekil 37: Sol elli nötrinonun ayna görünüşü, var olmayan bir sağ elli nötrinodur.

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_{\mu L}$$

T önceyi sonraya çevirir. C parçacıkları karşı parçacıklara çevirir (ve tersi de geçerlidir). P sol elli spini sağ elli (right-sağ) spine çevirir. Üç kere gerçekleşmiş ters çevirme süreci sonunda ulaşılan sonuç:

$$\mu^- + \bar{\nu}_{\mu R} \rightarrow \pi^-$$

Her ne kadar bu sürecin pratikte gerçekleşmesini sağlama umudu yoksa da, bunun olası bir süreç olduğuna inanmak için her türlü gerekçeye sahibiz. TCP değişmezliği bir mutlak yasa gibi görünüyor.

60. Sadece "kısmi" olan korunum yasaları hangileridir?

İlk bakışta bir korunum yasasının gebelik sözkonusuyken, daha fazla kısmi olması beklenemez gibi görünmektedir. Bir nicelik ya sabittir ya da değildir. Ancak bir şey bir etkileşimde korunurken, diğerinde korunmayabilir. Böylesi bir niceliğe kısmi korunan denir. Tablo 2'de kısmi korunan böylesi iki nice-

lik; (birazdan açıklayacağımız) izospin ile kuark çeşnisi, ayrıca bunlara ek olarak "neredeyse" mutlak olarak korunan lepton çeşnisi niceliği sergilenmektedir. Kuark çeşnisi yeğin ve elektromanyetik etkileşimlerde korunur, ancak zayıf etkileşimlerde korunmaz. İzospin sadece yeğin etkileşimlerde korunur; hem elektromanyetik hem de zayıf etkileşimler tarafından çiğnenir. Burada bir kural kestiriminde bulunabilirsiniz. Yeğin etkileşim çoğu korunum yasası tarafından kuşatılarak kısıtlanırken, elektromanyetik etkileşim daha az, zayıf etkileşim daha da az yasa tarafından engellenir. Bu kimsenin yanıtlayamadığı ilgi çekici bir soruyu doğurur: Kütleçekim etkileşimi, hepsinin en zayıfı olarak, yine de daha fazla korunum yasasını mı çiğnemektedir? Bir gün sonuç olarak bu sorunun yanıtının evet olduğunu bulursak, bu bugün *mutlak* dediğimiz yasaların bazılarının gerçekte böyle olmadığını gösterir.

Tablo 2 Kısmi Korunan Nicelikler

İzospin (zayıf ve elektromanyetik etkileşimler hariç)
Kuark çeşnisi (zayıf etkileşim hariç)
Lepton çeşnisi (nötrino salınımı hariç)

İzospin kavramı, 1932'de nötronun keşfine dayanır. Nötronun kütlesinin protonun kütlesine çok yakın olduğu ve spinlerinin de aynı olduğu ortaya çıkmıştı. Eldeki veriler nötron ve protonun çekirdek içerisinde neredeyse-özdeş özellikte yeğin etkileşimler yaşadıklarını gösteriyordu. Bu nötron ve protonun altında aynı varlığın, nükleonun yattığı ve bunların nükleonun farklı "halleri" olduğu düşüncesinin doğmasına sebep olmuştu. Werner Heisenberg (aynı Heisenberg birkaç yıl önce kuantum mekaniğinin baş mimarı olarak belirsizlik ilkesini ortaya atmıştı), bir nükleonun proton durumundan nötron durumuna "bir fiskeyle çevrilmesinin", matematiksel olarak bir elektron spininin yukarıdan aşağıya çevrilmesiyle özdeş olduğunu savlayan bir kuram tasarlamıştı. Elektronun spininin sadece iki olası yönü vardır. Nükleonun da sadece iki olası durumu vardı,

nötron ve proton. Bu yüzden *izospin* adının, nötron ve proton arasında ileri-geri "çevrilmesine" rağmen, gerçek spin ile bir alakası yoktur.

Heisenberg'in kuramında nükleon "çift öğelidir". Daha sonra üç piondan oluşan bir "üç öğeli", iki Ξ parçacığından oluşan bir çift öğeli ve tek öğeli Λ parçacığı gibi başka "çok öğeliler" keşfedilecektir. İki veya daha fazla parçacıktan oluşan çok-öğelilerde kütleler çok benzer, ancak yükler farklıdır. İzospin korunumu yasasına göre, çok-öğelilerin tüm üyeleri özdeş yeğin etkileşimler yaşamaktadırlar. Çok-öğelilerin üyelerinin farklı yüklere sahip oldukları için, özdeş elektromanyetik etkileşimler yaşamayacakları aşikârdır. Zayıf etkileşimlerinde de farklılaşabilirler. Bu yüzden izospin kısmi olarak korunan bir niceliktir.

İzospin sadece yeğin etkileşen parçacıklara has bir kuantum özelliği olduğu için, korunumu da kuark korunum yasalarına tabi olabilmektedir. Yine de uzun bir tarihsel geçmişe sahip olması ve sadece gözlemlenemeyen kuarklar değil, gözlemlenebilir parçacıklarla da ilişkili olması sebebiyle ayrı olarak ele alınmayı hak etmektedir.

Tablo 2'de belirtilen ikinci kısmi korunum yasası kuark çeşnisidir. Altı kuarkın her birinin kendi çeşnisi olduğunu hatırlayın. Dil sürçmesine uygun bu çeşniler (Tanrıya şükür ki, otuz bir çeşit değiller) *aşağılık*, *yukarılık*, *acayiplik*, *tılsım*[65], *altlık* ve *üstlük* olarak adlandırılmaktadırlar. Bu korunum yasasını işbaşında görebileceğimiz bir örnek, bir pion ile bir proton çarpıştırıldığında, bir sigma parçacığı ve kaonun ortaya çıkışıdır.

$$\pi^+ + p \rightarrow \Sigma^+ + K^+$$

Kuark bileşenleri açısından belirtirsek;

$$u\bar{d} + uud \rightarrow uus + \bar{us}$$

Bu bir hızlandırıcıda (daha önceki bir çarpışmada pion yaratıldıktan sonra) büyük bir olasılıkla gerçekleşebilecek olan

65 Mantık *tılsımlık* veya *tılsımlılık* demeyi gerektiriyor, ancak parçacık fizik isimlendirmelerinde mantık her zaman işlemiyor.

bir yeğin etkileşim sürecidir. Yukarılık korunmaktadır, solda üç sağda üç kuark vardır. Soldaki aşağı ve karşı aşağı kuarkların toplam aşağılıkları sıfırdır ve sağda bu da korunmaktadır. Ve yine soldaki sıfır acayiplik, sağda bir acayip ve bir karşı acayip kuarkın yer almasıyla karşılanmaktadır.

Şimdi bu süreçte ortaya çıkan iki parçacığın bozunumlarına bakalım:

$$\Sigma^+ \rightarrow n + \pi^+$$

ve

$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

Kuark bileşenleri cinsinden bu bozunumlar sırasıyla;

$$uus \rightarrow ddu + u\bar{d}$$

ve

$$u\bar{s} \rightarrow \text{hiç}$$

Sigma bozunumunda yukarılık korunmasına rağmen, aşağılık bir artmakta ve acayiplik bir azalmaktadır. Bir acayip kuark, bir aşağı kuarka dönüşmüş gibi gözükmektedir. Kaon bozunumunda yukarılık bir azalır ve acayiplik bir artar, burada da bir yukarı kuark bir acayip kuarka dönüşmüş gibidir. Bunlar sahiden gerçekleşen süreçlerdir; ancak kuark çeşnilerini korumadıkları için, yeğin değil zayıf etkileşimle gerçekleşirler. Dolayısıyla "yavaştırlar", yarı ömürleri sırasıyla yaklaşık 10^{-10} saniye ve 10^{-8} saniyedir.

Tablo 2, lepton çeşnisini de sadece kısmi korunanlar arasında listelemektedir. Bu ancak nötrino salınımı tarafından çiğnenen "neredeyse" mutlak bir yasadır (ve bu yüzden Tablo 1'de yer alır).

61. Hangi simetri ilkeleri sadece "kısmidir"?

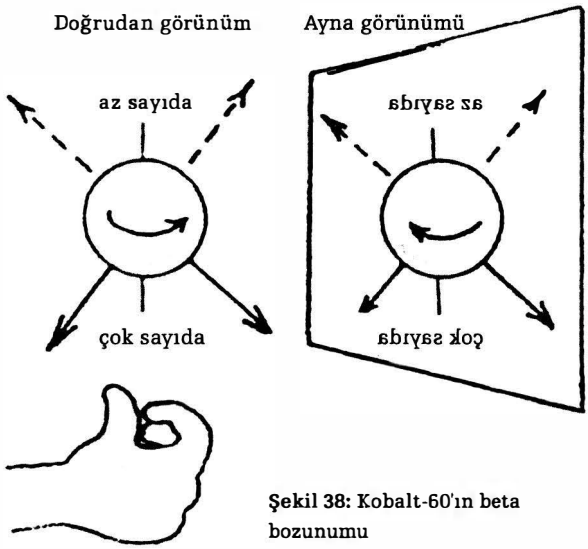
Tablo 3 bize üçü bir arada alındığında (TCP) bir mutlak simetri oluşturdukları düşünülen üç "ters çevirme" simetrisinin, zayıf etkileşimlerce çiğnenmeleri nedeniyle, sadece kısmi özellikte olduklarını gösteriyor. İsterseniz her birini tek tek ele alarak zayıf etkileşimlerce nasıl çiğnendiklerini görelim.

Tablo 3 Kısmi Simetri İlkeleri

T	zamansal ters çevirme
C	yük eşleneği
P	Parite veya ayna değişmezliği
PC	birleşik

Paritenin (P) zayıf etkileşimler için geçerli bir simetri ilkesi olmayabileceği fikri, ilk olarak 1956 yılında iki Çinli-Amerikalı teorisyence; o dönemde yirmi dokuz yaşında Columbia Üniversite'sinde olan Tsung Dao (T.D.) Lee ve otuz üç yaşında Princeton'daki İleri Çalışmalar Enstitüsünde olan Chen Ning (Frank) Yang tarafından ortaya atıldı. Lee'nin Columbia'dan çalışma arkadaşı olan Chien Shiung Wu da hızla parite ilkesini test etmeye girişti. Tüm öğrencileri ve çalışma arkadaşlarının kendisine hitabıyla Madam Wu, çok düşük sıcaklıkları elde etmede uzmanlıklarıyla tanınan Washington'daki Ulusal Standartlar Bürosu (*National Bureau of Standards*)'da görevli araştırmacıların yardımından faydalandı. Wu deneyinde kobalt–60 radyoaktif izotopu örneğini mutlak sıfıra yaklaşan çok küçük bir derece kesrinde soğutarak, manyetik alandaki çekirdeklerin bir saf halinde dizilimini sağladı. (1 derecelik bir sıcaklık bile tüm çekirdeklerin gruplaşmadan çıkmalarına neden olacak derecede "sıcak" olurdu.) Şekil 38 düzenlemeyi ve sonuçlarını şematik olarak göstermektedir.

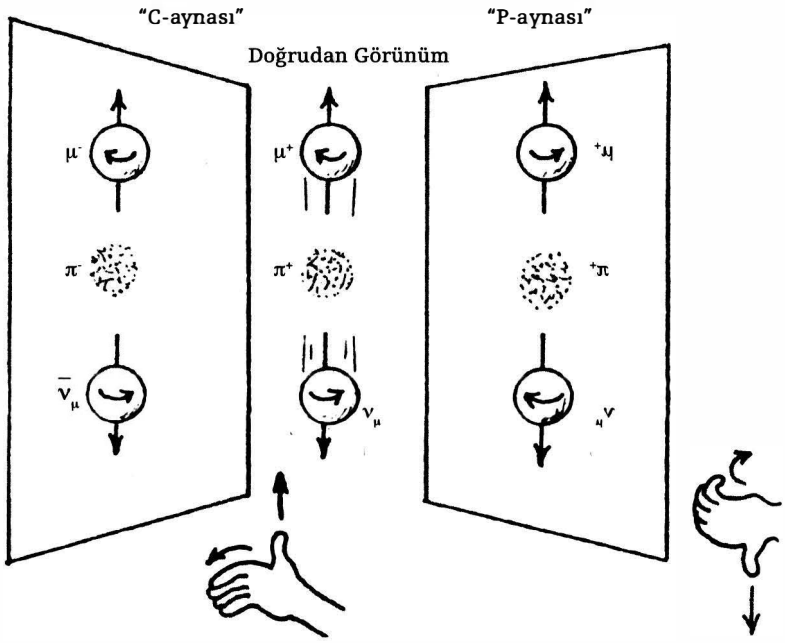
Şekilde sağ el parmakları kobalt–60 çekirdeğinin spin yönünü göstermektedir. Yukarıyı gösteren başparmak, çekirdeğin "kuzey kutbunun" yukarıda olduğunu gösterir. Madam Wu'nun gözlemine göre; çekirdekler dizilime girdiklerinde, beta bozunumlarından gelen elektronlar tercihen aşağıda ("güney kutbu" yönünde) toplaşmaktaydılar ve sadece birkaçı yukarıda kalmaktaydı. Şimdi bir de bu sürecin aynada nasıl görüneceğini düşünelim. Şekilde görüldüğü üzere ayna görüntüsünde bir çekirdek, kuzey kutbu altta ve elektronları da tercihen bu yönde olacak şekilde görülmektedir. Aynı görüntüsü olanaksız bir durumu resmetmektedir. Parite simetrisi



Şekil 38: Kobalt-60'ın beta bozunumu

geçerli bir ilke olsaydı, elektronların yukarı ve aşağı yönlerde eşit biçimde toplaşması gerekirdi, çünkü ancak o zaman ayna görüntüsü ve gerçek görüntü eşdeğer olabilirdi. Bu kadar basit, ancak aynı zamanda bu kadar derin işte. (Bu deneyde mutlak sıfıra üç binde bir derece kesrinde yaklaşmış olmak büyük bir başarıydı; bugün için rutin ancak o dönemlerde çok zor bir işlemdi bu.)

Madam Wu'nun çalışmasından kısa bir süre sonra, Columbia Üniversitesi'nden başka bir ekip *hem* C-değişmezliği *hem de* P-değişmezliğinin zayıf etkileşim tarafından ihlal edildiğini ortaya koydu. Leon Lederman (sonradan başka bir çalışması için Nobel Ödülü kazanacaktır), Richard Garwin ve Marcel Weinrich ile birlikte Columbia *cyclotron*'unu pozitif pionlar oluşturmak için kullandı ve ardından pionların müonlara (ve görünmeyen nötrinolara) bozunumlarını inceledi. Şekil 39'da ortadaki bölüm, pozitif bir pionun bir pozitif müon (bu karşı müon demektir) ve bir müon nötrinosuna bozunmasını göstermektedir. Bahsettiğimiz araştırmacılar müonun izleyen bozunumunu inceleyerek onun "tek-elli" olduğunu tespit ettiler. O



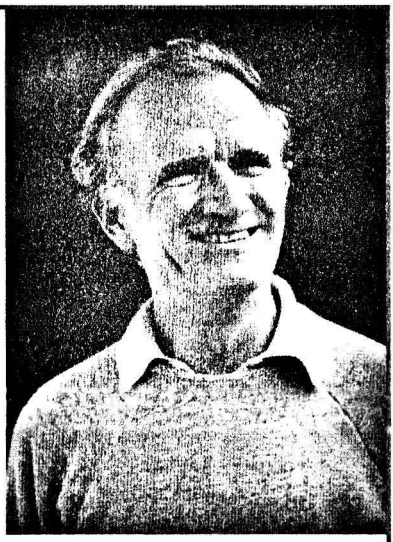
Şekil 39: "C-aynası" ve "P-aynası" görünümleriyle pozitif pionun bozunumu. Başparmaklar nötrinonun spin yönlerini "C-aynası" ve "P-aynası"nda göstermektedir. Diğer düz oklar hareket yönünü belirtmektedir.

zamanın koşullarında müonun sol- veya sağ-elli olup olmadığını söyleyemiyorlardı, ancak doğru bir biçimde görünmeyen nötrinonun da müonla aynı ele sahip, yani tek-elli olması gerektiğini çıkarsayabiliyorlardı. Bu momentum ve açısal momentumun korunması yüzündendir. Momentum korunumu, iki bozunum parçacığının sırt sırta uçuşarak uzaklaşmalarını gerektirir. Açısal momentum korunumu, bozunum parçacıklarının toplam spininin zıt yönlü olmasını ve böylelikle toplamlarının (vektör toplamlarının), pionun sıfır spinine uygun olacak şekilde, sıfır olmasını gerektirir. Şekilde pozitif müonu sol-elli olarak (böyle olduğu sonradan tespit edilecektir) gösterdim. Sol el başparmağınız müonun hareket ettiği yönü (yukarıyı) gösteriyorsa, sol elinizdeki bükülü parmaklar müonun

spin yönünü gösterir. Nötrino da *hem* zıt yönde hareket ettiği için *ve hem de* zıt yönde spin ettiği için, sol-ellidir.

P ve C konusundaki gerekçelere geldik. Şekilde sağdaki sıradan bir aynadır, burada *P-aynası* adı verilmiştir. Bu ayna bir pozitif pionun, bir sağ-elli pozitif müon ve bir sağ-elli nötrinoya bozunduğunu göstermektedir. Bu olanaksız bir süreçtir, çünkü nötrinolar sol-ellidir. P geçerli bir simetri değildir. Soldaki ise bir "C-aynası"dır; mucizevî biçimde parçacıkları karşı parçacıklarla değiştirmekte ve diğer özellikleri değişmeksizin bırakmaktadır. Burada bir negatif pionun, bir sol-elli negatif müona ve bir sol-elli karşı nötrinoya bozunduğu görülmektedir. Yine olanaksız bir süreçle karşı karşıyayız, çünkü karşı nötrinolar sağ-ellidir. Dolayısıyla C geçerli bir simetri değildir. (P ve C hakkındaki bu çıkarımların sadece bu bozunum sürecine hükmeden zayıf etkileşim için yapıldığını aklımızda tutalım.)

Bu deneyler sonuçlandıktan belli bir süre sonra, fizikçiler C ve P ayrı ayrı olmasalar da, birleşik CP değişmezliğinin geçerli olabileceği düşüncesini koruyorlardı. Bu doğru olsaydı (doğru değildir), o zaman T değişmezliği mutlak bir ilke katına yükselirdi. Ancak öyle değildi. 1964'te Long Island'daki Brookhaven hızlandırıcısında çalışan Princeton Üniversitesi'nden iki fizikçi, Val Fitch ve James Cronin, yüksüz kaonun uzun süre varlığını sürdüren bir çeşidinin, genellikle üç piona bozunmasına karşın, arada bir (yaklaşık beş yüzde bir oranında) iki piona bozunduğunu keşfettiler. Kuram bunun sadece, birleşik CP değişmezliği ve onunla birlikte T değişmezliği mutlak olarak geçerli ilkeler değilse, mümkün olabileceğini göstermekteydi. Fitch ve Cronin'e 1980'de Nobel Ödülü kazandıran bu keşif, fizikçiler açısından P ve C değişmezliğinin önceki alt üst oluşundan daha fazla rahatsızlık vericiydi. Bunun nedeni, madde ve karşı madde arasında temel bir farka işaret etmesiydi. Val Fitch, PC (ve T) değişmezliğinin başarısızlığının bizim varoluş nedenimiz olduğunu söylemekten hoşlanırdı. Bugün fizikçiler madde ve karşı madde arasında tam simetri olmaması sayesinde, Büyük Patlama'dan hemen sonraki evrenin ilk döneminde kuark ve karşı kuarkların eşit sayıda olmadıklarını dü-



Val Fitch (d.1923), burada 1980 yılında bir Ekim sabahı Nobel Ödülüne henüz layık görüldüğü bir dönemde fotoğraflanmış. Fitch, Nebraska'nın kırsal kesiminde doğdu. II. Dünya Savaşı sırasında üniversite eğitiminin henüz bir bölümünü almış bir genç asker olarak Los Alamos'ta çalışmaya gönderildi. Burada zamanın ünlü fizikçilerinin birçoğuyla yan yana çalışarak deneysel fizik tekniklerini öğrendi. Columbia Üniversitesi'nden mezun olduktan sonra "müonik atomlar" üzerine çalışmak istedi; ağır çekirdekler etrafında enerji durum basamaklarını inip çıkan negatif müonlar tarafından yayılan fotonların enerjisini ölçmeye koyuldu. 1990'larda Fitch'i tanıdığımda, halen daha üzerinde bu fotoğraftan ışıyan aynı samimiyet ve çekimi taşıyordu.

şünmekteler. Hesaplamalara göre her 1 milyar kuarka karşılık olarak 999 milyon karşı-kuark vardı. Toz bulutu dağıldığında her bir milyar kuark içerisinden biri yaşamını sürdürerek protonların, nötronların, galaksilerin, yıldızların, gezegenlerin ve bizlerin oluşumunu sağladı.

62. Yasaklama ve zorunluluk yasaları nedir?

Kuantum fiziğiyle birlikte doğanın temel yasalarını kavrama ve yorumlama biçimimizde iki büyük değişiklik gündeme geldi. Bunlardan birincisi, büyük ölçekli dünyanın düz doğrusal devamlılığının yerini, atom-altı dünyanın yok olma ve var olmayı içeren patlamalı olaylarının almasıdır. Diğeri de kesinliğin yerini olasılığın almasıdır. Birbirinden bu derece farklı dünya görüşleri nasıl bağdaşabilir? Çünkü bu yok olma-var olma olaylarını çoklu trilyon patlamayla üst üste yığdığımızda, ortaya çıkan yığın devamlılığa benzemekte ve olasılıklar kesinliğe doğru ilerlemektedir.

Fiziğin tipik klasik bir yasası, *zorunluluk yasasıdır*. Bu yasa, çıkış koşulları bir kez belirli olduktan sonra, neyin olmak *zorunda olduğunu* dikte eder. Örneğin bir uzay aracını Dünya atmosferinin üzerindeki belirli bir noktaya kadar havalandırabilir ve ardından motorunu kapatırsanız, Dünya, Ay, Güneş ve gezegenlerin kütleçekimi gemiye onun uzayda belirli bir yolda ilerlemesini sağlayacak merhametsizlikte yol gösterecektir. Belirli bir andaki yerini ve hızını biliyorsanız, Newton'un hareket yasalarının zorunluluğu altında bundan sonra sonsuza dek nerede olacağını güvenle hesaplayabilirsiniz. (Sadece başlangıçtaki yer ve hızını mutlak kesinlikte bilmediğiniz için biraz belirsizlik sözkonusu olabilecektir).

Klasik dünyadan başka bir örnek: Boy ve konumlanması verili olan bir antendeki elektronlar belli bir genlik ve frekansta titreştiklerinde, Maxwell'in elektromanyetizma yasalarının zorunluluğu altında, yayımın elektromanyetik ışınımının tam örüntüsünü çıkarmak mümkün olabilmektedir.

Buna karşın kuantum yasaları size neyin *olmak zorunda* olduğundan daha çok, neyin *olamayacağını* söylemeye daha yakındır. Bu anlamda bunlara yasaklama yasaları diyebiliriz. Örneğin bir proton bir diğerine belli bir enerjiyle çarptığı zaman çok sayıda olası sonuç sözkonusudur. 1 GeV civarında ulaşılabilir enerji için kimi olasılıklar şunlardır:

$$
\begin{aligned}
p + p &\rightarrow p + p \\
&\rightarrow p + p + \pi^0 \\
&\rightarrow p + p + \pi^+ + \pi^- \\
&\rightarrow p + n + \pi^+ \\
&\rightarrow \Sigma^+ + n + K^+
\end{aligned}
$$

Eğer buradaki gibi tümü özdeş, çok sayıda proton-proton çarpışması olursa, bunlar ve çeşitli başka olasılıklar, her biri kendi olasılığında olmak üzere, gerçekleşecektir. Öte yandan *gerçekleşmeyecek* sonuçların listesi ise sınırsızdır. Korunum yasalarından herhangi birisini çiğneyen sonuç, gerçekleşmeyecektir. (Bir sonuç sadece bir kısmi korunum yasasını çiğniyorsa, gerçekleşebilir; ancak çok daha düşük bir olasılıkla.)

Korunum yasaları yasak koyan, yasağı uygulayan polislerdir. Yükün korunumu içlerinde en bariz olanıdır. Toplam yükün +2 olmadığı tüm sonuçlar yasaklanmıştır. Diğer yasaklı sonuçlar; enerjinin arttığı, kuark sayısının değiştiği, tekil bir leptonun yaratıldığı sonuçlardan herhangi birisi veya son ürünlerin spinlerinin birleşik olarak sıfır veya küçük bir tamsayı değeri alamamasıdır.

Olası sonuçların çeşitliliği ilginç bir soru doğurmaktadır: Korunum yasalarıyla uyumlu olan olası sonuçların tümü gerçekten gerçekleşir mi? Her ne kadar yanıtın evet olması gerektiği açık olmasa da, fizikçiler bu sorunun yanıtının evet olduğunu düşünmekteler. Örneğin evinize uygun uzaklıktaki dört farklı süpermarkette de fiyatını makul bulduğunuz ürünler satılıyorsa, bu durumda bu marketlerden alışveriş edeceğiniz, her birinden de aynı frekansta alışveriş edeceğiniz otomatik anlamı çıkmaz. Hangi nedenle olursa olsun, bunların bazılarından hiç alışveriş etmemeniz mümkündür. Sadece dört tane "izin verilen" süpermarket, çok büyük sayıdaysa "yasaklı" süpermarket vardır; bunlar işe gidiş geliş yolunuz üzerinde değildirler veya tercih ve zevklerinizle uyumlu yerler değildirler. Klasik bir varlık olarak bu dördünden hangisini seçeceğinize karar verirsiniz. Bir kuantum varlığı olsaydınız, seçim hakkınız yoktu: Hepsinden eşit frekansta olmasa da, dördünden de alışveriş yaparsınız. İzin verilen olasılıkların tümünün gerçekleşiyor gibi olması, kimi fizikçilerin zorunluluk fikrini tekrar meseleye dâhil etmesini beraberinde getiriyor: "*Olabilecek* her şey *olmak zorundadır*."

Serbest bırakılan uzay aracının yeri ve hızı konusunda "ilk koşullar/ başlangıç koşulları" konusuna değinip geçmiştim. Bir protonun bir diğeriyle belli bir enerjide doğrudan çarpıştırılması da başlangıç koşuludur. Klasik yasalar ile kuantum yasaları arasındaki fark şudur: Klasik açıdan, başlangıç koşullarının verili seti altında, sadece bir sonuç gerçekleşir. Kuantum mekanik açıdan, başlangıç koşullarının verili seti altında, çok sayıda olası sonuç sözkonusudur. *Korunum yasaları* belli sonuçlara izin verir, diğerlerini yasaklar. Kuantum yasaları izin verilen sonuçların göreli olasılığını emreder.

63. Simetri, değişmezlik ve korunum kavramları birbirleriyle nasıl ilişkilenmektedir?

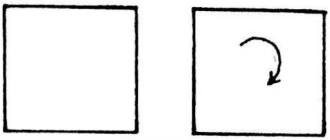
Fizikçiler bazen yeterli dikkati göstermeksizin simetri, değişmezlik ve korunum kavramlarını birbirlerinin yerine kullanabilmektedirler. Her biri farklı anlamdadır, ancak bir ortak yönleri vardır: Üçü de değişimin olmayışıyla, sabit kalan şeyle ilgilenirler. Ayrıca üç fikir birbiriyle bağlantılıdır.

Fizikçiler ne kadar dikkatli olmaya çalışsalar da, simetri, değişmezlik ve korunum dediklerinde her zaman aynı şeylerden bahsetmezler. İyisi mi, işe yarayabilecek tanımlar getirelim: *Simetri*, gerçek veya varsayımsal bir değişiklik, *fiziksel durumu* değişmeden bırakıyorsa gerçekleşir. *Değişmezlik*, yine gerçek veya varsayımsal bir değişiklik, bir ya da daha fazla *doğa kanununu* değişmeden bırakıyorsa gerçekleşir.[66] *Korunum*, belli bir *fiziksel nicelik* bir değişim süreci boyunca aynı kalıyorsa gerçekleşir. Örneklerle açıklayalım.

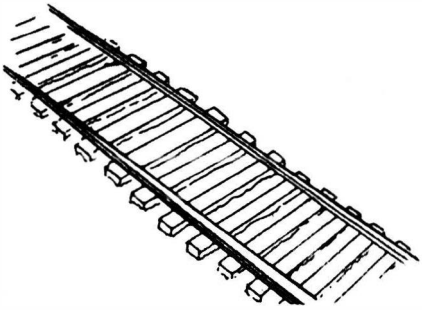
Bir kare (*bkz.* Şekil 40) dönel simetriye sahiptir. 90 derecelik (veya 180, 270 derecelik) bir dönme sonrasındaki görünümü, dönme öncesiyle aynıdır. Eşit aralıklı traverslerle inşa edilmiş düz bir demiryolu, *dönüşümsel* dediğimiz simetriye sahiptir. Yönü boyunca traversler arası herhangi bir kayma, görünümünü değiştirmez. Ingres'in portrelerinde bir kadın yüzündeki sol-sağ simetrisi görülebilir. Bu, portrenin sol ve sağ tarafları değiştirildiğinde, görünümün değişmeyeceği veya neredeyse değişmeyeceği anlamına gelir. Şekil 40'daki maske bu simetriyi daha tam bir biçimde gösterir. Sol-sağ simetrisinin ayna simetrisi veya değer eşitliği dönüşümü ile aynı olduğunu onaylayacaksınızdır.

61'inci soruya yanıt olarak P, C ve T "ters çevirme simetrilerini" ele alırken, aslında simetrinin ötesine geçerek değişmezlik konusuna girmiştim. Çünkü soru sadece "şeyler ters çevirmeden sonra aynı mı görünür" değil, "ters çevrilmiş fiziksel süreçler mümkün müdür" idi. Dolayısıyla soru; değer eşitliği,

66 *Değişmezlik* hesaplanmış bir niceliğin değişmeden kalması anlamına da gelebilir, ancak tanımı bu kullanıma doğru genişletmeyeceğim.



90° dönme sonrası aynı görünüm



Traverslerin tam-sayı kayma sonrasında aynı görünmesi

Sol-sağ değişimi sonrası aynı görünüm

Şekil 40: Simetri çeşitleri

yük eşleneğini ve zamanı çevirme tersinlemeleri uygulandıktan sonra, doğa yasalarının aynı ("değişmez") olup olmadıkları üzerineydi.

Şimdi tartıştığımız simetriler (P, C ve T'nin yanında karenin, tren yolunun, maskenin simetrileri), *"kesikli simetriler"*dir. Daha önceki koşullarına dönmek için sonlu değişiklikler yeterli olur. Bazı *"sürekli simetrilerin"* olduğunu da biliyoruz. Başlıca örneklerinden biri uzayın türdeşliğidir. Boş uzayın derinliklerinde nerede olduğunuzu bilmezsiniz ve bilmenizin de yolu yoktur. Uzayın bir parçası diğer parçalardan tam anlamıyla farksızdır. Bir nanometre de, bir mil de gitseniz aynı kalır. Uzayın tek başına kendisini ayırt edici karakteristikleri sözkonusu değildir. Her yerde aynıdır. Bu simetri (herhangi bir yönde herhangi bir miktarda yer değiştirme fiziksel durumu değiştirmez) doğrudan bir değişmezlik ilkesine taşır bizleri: Doğanın yasaları her yerde aynıdır. Bunun doğru olduğuna inanmak için her türlü gerekçemiz var; uzak galaksilerin hareketleri, çok uzak yıldızsı gökcisimlerindeki nükleer tepkimeler ve fotonların evren boyunca hareketi üzerine öğrendiklerimizden edindiğimiz bolca kanıt sözkonusu.

Bir başka sürekli simetri "uzayın yön bağımsızlığı (izotropisi)". Bu, uzayda tercih edilen konumlar olmaması gibi, tercih edilen yönlerin de olmaması anlamına gelir. İlgili değişmezlik ilkesi, doğa yasalarının belli bir yöne yönelmeden (oryantasyondan) bağımsız olmasıdır.

1915 yılında dünyada fazla sayıda kadın matematikçi yoktu, Emmy Noether'in kavrayışına sahip matematikçi ise her iki cinste de fazla yoktu. O yıl, otuz üç yaşında, Almanya'daki Göttingen Üniversitesi'nde, ünlü matematikçi David Hilbert'in deyim yerindeyse "koruması" altında[67] çalışırken Noether simetri ile korunumu birbirine bağlayan çok önemli bir kuram ortaya attı. Halen *Noether kuramı* diye bilinen bu kuram, doğadaki her sürekli simetri için bir korunum yasası olduğunu söyler. (Kuram hem klasik fiziğe, hem de kuantum fiziğine uygulanabilmektedir.)

İzin verirseniz, onun matematiksel yaklaşımını kullanmadan, uzayın türdeşliğinin (her yerde aynılığının), Noether kuramının çıkarımlarından biri olan momentumun korunumu ile nasıl ilişkilendiğini anlatmaya çalışayım. Dış uzayın derinliklerinde, tüm kütleçekimsel etkilerden tamamen uzakta bir uzay aracının belli bir rotada belli bir hızda hareket ettiğini düşünün. Newton'un birinci hareket kanununa göre, uzay aracına daha sonra tekrar baktığımızda, başka bir yerde ancak aynı yönde ve aynı hızla hareket ediyor olacağını biliyoruz. Newton'un birinci yasası, dış etkilerin olmadığı koşullarda bir nesnenin düz bir çizgide sabit bir hızla hareket edeceğini söyler. Momentumu değişmez. Biraz daha derine inerek, bunun *neden* doğru olduğunu sorabiliriz ve yanıt da uzayın türdeşliği olur. Uzay aracı birdenbire momentumunu değiştirmiş olsaydı, uzayda olduğu nokta ile olacağı nokta arasında bir fark olurdu. Veya başlangıçta hareketsiz olsa ve sonradan hareket etmeye başlasa, daha sonrasında farklı bir noktada daha önce sahip olmadığı bir momentumla gözlemlenirdi.

67 Hilbert'in tüm destek ve çabasına karşın Noether, Göttingen'de 1919 yılına dek normal bir akademik konum kazanamadı. 1916–1917 yıllarında verdiği bir ders, üniversite katalogunda şu biçimde yazılıydı: "Matematiksel Fizik Semineri: Profesör Hilbert, Dr. E. Noether'in yardımıyla, Pazartesileri 4–6 arası, katkı payından muaf"

Uzayın bir ve diğer yerdeki bu basit aynılığının, momentumun korunumu kanunu gibi hayati bir temel dayanağı açıklıyor olması şaşırtıcı bir düşüncedir.

Yönünü değiştirecek hiçbir manyetik alanın sözkonusu olmadığı, dış uzaydaki bir pusula iğnesini düşünelim. Eğer belli bir anda belli bir yönü gösteriyorsa, iğnenin birden kendiliğinden başka bir yönü göstermesini beklemeyiz. Bunu yapıyor olsaydı, bu uzaydaki tüm yönlerin birbirine denk olmadığı, bir diğer deyişle uzayın *izotropik* olmadığı anlamına gelirdi. Noether'in kuramı uzayın yönel simetrisine uygulandığında varılan sonuç, açısal momentumun korunduğu oldu. Tüm parçacık etkileşimlerini kontrol eden bu temel yasa, uzaydaki tüm yönlerin denk olduğu gerçeğinden çıkışını almaktadır.

Tamamlarken; enerjinin korunumunun, herhangi bir zamanın başka herhangi bir zamana fiziksel denkliği anlamına gelen zaman simetrisine dayandığını da belirtmeliyim.

Bu sürekli simetrilerin, aynı zamanda, değişmezlik ilkeleriyle de ilişkili olduğuna dikkat ediniz. Doğa kanunları nerede olduğunuza, hangi yönde hareket ettiğinize veya saatin kaç olduğuna bağlı değildir.

XI. Bölüm

Dalgalar ve Parçacıklar

64. Dalgalar ve parçacıkların ortak noktaları nelerdir? Farkları nelerdir?

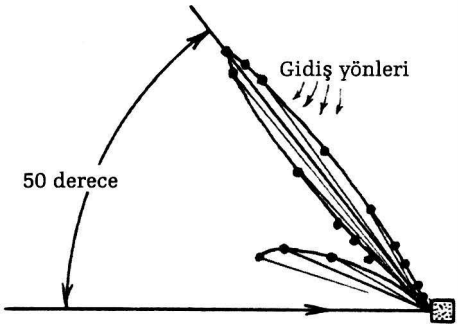
İlk bakışta dalgalarla parçacıkların ortak herhangi bir noktası olmadığı düşünülecektir. Dalgalar mekânda yayılı haldedirler, sınırları da belirsizdir. Bir dalganın "şu noktada" olduğunu söyleyemezsiniz. Öte yandan parçacıklar iyi tanımlanmış sınırları olan küçük külçelerdir; belki de bahsi geçen parçacıklar lepton veya kuarksa fiziksel uzama dahi sahip değillerdir. Parçacıkların kütlesi vardır. Dalgalara ise genellikle bir kütle atfetmeyiz. Dalgalar dalga boylarıyla, frekansları ve genlikleriyle karakterize olurlar; parçacıklardaysa bu kavramların açık karşılıkları yoktur. Dalgalar *kırınıma uğrayabilir* (köşeler etrafında bükülebilir) ve *girişime uğrayabilir* (birbirlerini destekleyebilir veya bozabilirler); bu davranışlar parçacıklar-

Şekil 41: Bir dalga titreşimi, bir parçacıkta olduğu gibi, enerji ve momentumu bir yerden diğer bir yere taşımaktadır.

dan beklenmez. Gerçekten de ışığın girişime uğradığının tespit edilmesi, on dokuzuncu yüzyılda ışığın parçacıklardan değil de, dalgalardan oluştuğuna bilimcileri ikna etmişti.

Yine de dalgaların neler *yapabildiği* üzerine düşündüğünüzde, parçacıklarla ortak olan yönlerini görmeye başlarsınız. Dalgalar, tıpkı parçacıklar gibi, enerjiye ve momentuma sahip olabilir ve bu nicelikleri bir yerden başka bir yere iletebilirler. Yine parçacıklar gibi, belli bir hızda hareket ederler. Dahası dalgalar, en azından kısmi olarak sınırlandırılabilirler; bu sınırlar tam keskin olmasa da, dalgaların da sınırları olabilir. Bir obuadaki titreşen hava, fagottakine göre daha fazla sınırlandırılmıştır; fagottaki hava da büyük bir borulu orgdakine göre daha fazla sınırlandırılmıştır. Veya bir arkadaşınızla beraber gerilmiş bir ipin iki ucundan tuttuğunuzu düşünün (Şekil 41). Elinizdeki ucu hızla oynatırsanız, sınırlandırılmış bir dalga titreşiminin ip boyunca hareket ettiğini görürsünüz. İp, bir topu karşınızdakine atmanıza benzer şekilde, belli bir uyarımı arkadaşınızın eline iletir.

Dalga ve parçacığın evliliği, Einstein'ın ışık zerresi (foton) ile birlikte mümkün oldu. Bu çok uzun bir süre boyunca pek az bilimcinin onayladığı bir birliktelik oldu. Işığın hem dalga hem parçacık olabileceği fikri, 1905'ten 1920'lerin ortalarına dek, çoğu bilimcinin hazmetmekte zorlandığı bir fikir olmaya devam etti. Bazılarını Compton'un X-ışınlarının atomlardaki elektronlar tarafından saçılımı üzerine olan 1923 tarihli deneyleri ikna etti. Başka bazıları için de Bose'nin Planck'ın ışınım yasasından yola çıkarak yaptığı çıkarımlar ikna edici oldu. Pozitif kanıt 1927 yılında sağlandı. ABD'deki Bell Laboratuarlarında çalışan Clinton Davisson ve Lester Germer ve onlardan bağımsız olarak İskoçya'da Aberdeen Üniversitesi'nde



Elektronların nikel hedefe doğru uçuşması

Şekil 42: Davisson ve Germer'in deney sonuçları, 54 eV'lik elektronların nikel bir kristale çarptıktan sonra çoğunlukla belli bir yönde toplaştıklarını, bunun nedeninin elektronun kırınım ve girişimi olduğunu gösteriyor.

çalışan George Thompson (elektronu keşfeden J.J.'in oğlu), katı kristalli bir malzemenin yüzeyine çarpan elektronlarda kırınım ve girişim etkileri görüldüğünü tespit ettiler (Şekil 42). Hatta kristaldeki atomların aralıklarının biliniyor olmasından ve elektronların kristalli yüzeyden tercihli sekme açısının ölçülmüş olmasından yola çıkarak, elektronların dalga boyunu dahi ölçebilmişlerdi.

Bu ilk deneylerde elektronların dalga boyu, katı maddedeki atomların aralıkları ile mukayese edilebiliyordu. Sonrasında deneyciler nötronların gerekli ölçüde yavaşlatılmasını ve dalga boyunun, katı maddedeki atomların aralıklarını, farklı biçimde aşmasını sağlamayı öğrendiler. (Hız ve dalga boyu arasındaki bu ters bağlantıyı bir sonraki sorunun yanıtında açıklayacağız.) Sonuç olarak bir malzemede amaçsızca sürüklenen bir nötron, tekil bir atom çekirdeğinden daha küçük bir parçacıktan nadir beklenen bir hareketle, dalga boyu aracılığıyla "dışa uzanarak" aynı anda çok sayıda atomla etkileşime geçmektedir.

65. De Broglie denklemi nedir? Neden önemlidir?

Niels Bohr'un hidrojen atomunun kuantum kuramı üzerine olan çığır açıcı çalışması ile tesadüfen aynı yıl, 1913 yılında

genç Fransız prens Louis-Victor de Broglie fizikteki lisans derecesini aldı. Kuantum fiziği o tarihte de Broglie'nin zihninde var mıydı bilmiyorum; ancak daha sonra, 1929'daki Nobel ödülü konuşmasında "tüm bir fizik alanını ele geçirmeye devam edecek olan garip kuantum kavramına" karşı hissettiği çekimden bahsedecektir.

I. Dünya Savaşı'nda yer alışının ardından de Broglie, fizikte yüksek lisans çalışmasını tamamlar ve 1924'te Paris Üniversitesindeki doktora tezinin bir bölümünde, şimdi kendi adını taşıyan aldatıcı basitlikteki güçlü denklemini ortaya atar. De Broglie denklemi şöyledir:

$$\lambda = h / p$$

Soldaki λ (lambda) simgesi dalga boyunu simgeler; besbelli bir dalga özelliğidir. Sağ tarafta paydada yer alan p momentumdur; besbelli bir parçacık özelliğidir. İkisini birbirine bağlayan Planck sabiti h'dir; kuantum fiziğindeki *tüm* denklemlerde karşımıza çıkar. Bu denklem fotonlar için geçerliydi; tabii fotonların varlığını kabul ediyorsanız. De Broglie, bunun elektronlar ve tüm parçacıklar için geçerli olduğunu ileri sürdü. Davisson, Germer ve Thomson birkaç yıl sonra elektronların dalga boylarını ölçtüklerinde, ölçümlerinin de Broglie'nin denklemine uyduğunu buldular. De Broglie denklemi zamanın sınamasını başarıyla geçerek kuantum fiziğinin temel direği haline geldi. Görünüşüyle Einstein'ın $E=mc^2$'sine denk bir sadeliğe ve güce sahip olduğunu görüyoruz.[68]

De Broglie sonradan, bizim bugün *dalga-parçacık ikiliği* dediğimiz iki şeyin, kendisini bu denkleme ulaştırdığını ifade edecektir. Bunlardan birincisi, Compton'un o dönemde yeni gerçekleştirmiş olduğu 1923 tarihli çalışmasında, X-ışınlarının hem dalga hem parçacık özellikleri gösterdiği yönünde sunduğu kanıttır. Diğeri ise, de Broglie'nin klasik dünyada dalgaların genellikle öbekli (kuantize) oldukları, an-

68 Einstein'ın denkleminin neden Planck sabitini içermediğini merak edebilirsiniz. Bu $E=mc^2$'nin aslında kuantum dünyasında da geçerli olan ***klasik*** bir denklem olmasından ileri gelir.

cak görünüşe göre parçacıkların öbekli olmadıkları yönündeki gözlemidir. Bir kemandaki tellerin ve flütteki hava kolonunun gelişigüzel değil, sadece belirli seçili frekanslarda titreştikleri gerçeği üzerine odaklanır. De Broglie şu soruyu yöneltir: O dönemde atomlarda olduğu bilinen öbekleşme (kuantizasyon) titreşen bir dalganın sonucu olabilir mi; acaba atom bir çalgı aleti gibi düşünülebilir mi?

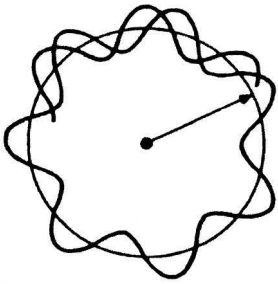
Einstein ve de Broglie'nin denklemlerinin yapısı, birbirlerinden basit ancak önemli bir yönden ayrışmaktadır: $E=mc^2$'de E de m de "üst kattadır". E, m'ye doğru orantılıdır. Daha fazla kütle, daha fazla enerji anlamına gelir. $\lambda = h / p$ ise tersine; λ "üst katta", p "alt katta", yani paydadadır. Dalga boyu ve momentum *ters* orantılıdır. Bu bir parçacığın momentumunu artırmanın, parçacığın dalga boyunu azaltacağı anlamına gelir. Büyük hızlandırıcılardaki protonların dalga boyları, zayıf güçteki hızlandırıcılardaki protonların dalga boylarına oranla, daha kısadır; böylelikle de çekirdek-altı uzaklıklardaki olayların incelenmesinde daha iyi olanaklar sunarlar. Çok düşük hızlara (ve küçük momentuma) indirilerek yavaşlatılmış nötronlar, göreli olarak daha uzun dalga boylarına sahip olurlar; bu onların bir anda çok sayıda atomla etkileşebilecek uzaklıklara erişmelerini sağlar. İnsan ölçeğine dönük çıkarımlar yapmamız da mümkün. Sokakta aşağıya doğru yürüdüğünüzde, momentumunuz vardır. De Broglie haklıysa, dalga boyunuzun da olması lazım. Öyleyse neden hissetmezsiniz?

Nerededir? Vardır; ancak atomik ölçekte momentumunuz öylesine büyüktür ki, dalga boyunuz tespit edilemeyecek derecede küçük olur. Saatte iki mil yürüyen 150 poundluk (68 kg) bir kişinin dalga boyu $4x10^{-34}$ inçtir; doğrusu bu da ölçüm için pek heves uyandırmaz. "Ancak daha yavaş yürüyebilir, böylelikle momentumumu düşürür ve dalga boyumu arttırabilirim" diyebilirsiniz. İyi fikir, ancak umutsuz bir düşünce: Bir yüzyılda 1 inç (yaklaşık 2,5 santim) sürünseniz, dalga boyunuz $5x10^{-23}$ inç olur, bu da tek bir protonun çapından çok daha azdır. Biz insanlar, beğenin ya da beğenmeyin, klasik dünyanın vatandaşlarıyız.

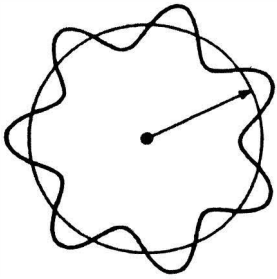
Ancak kütleyi parçacık dünyasına girecek ölçüde küçültürseniz, o zaman dalga boyu çok önemli hale gelir. Dalga doğası yüzünden atomdaki bir elektron, tüm atomu çevreleyecek şekilde yayılır. Benzer şekilde çekirdekteki nötron ve protonlar, kendilerini nükleer hacmin bütününe yayarlar. Bir parçacık sadece hızlandırılarak büyük bir enerjiye kavuşturulduğunda, parçacığın dalga boyu bir çekirdeğin boyutlarından daha küçük veya hatta tekil bir nötron ya da proton boyutlarında olacak şekilde azalır. O zaman yüksek enerjili parçacık, azaltılmış dalga boyuyla en küçük uzaklıkların incelenmesi için uygun koşulları sunabilir.

66. Dalgaların kuantum öbekleriyle bağlantısı nedir?

De Broglie tüm parçacıkların dalga özelliklerine sahip oldukları fikrini ortaya attığında, kuantum mekanik kuramı henüz bir bütün olarak geliştirilmiş değildi (de Broglie'nin çalışmasının da hızlandırıcı etkisiyle izleyen iki yıl içerisinde formüle edildi). 1924'de bilimciler halen atomlardaki elektronların "Bohr yörüngeleri" izledikleri düşüncesindeydiler. De Broglie'nin yaratıcı fikri, sadece belli yörüngelere izin verilmesinin *nedeninin*, parçacığa yörüngesinde eşlik eden dalganın öz pekiştirmesi veya yapıcı girişimi olduğunu varsaymasıydı. Şekil 43'te gösterildiği üzere bir dalga, yörünge çevresindeki yolculuğunu tamamladıktan sonra, kendisini yok edici şekilde girişime uğrayabiliyor ve genellikle de uğruyordu. Böylelikle de Broglie'nin düşündüğü gibi, dalga kendisini tamamen yok ediyor, birkaç yolculuk sonrasında ortalama sıfıra yaklaşıyordu. Böylesi bir yörünge var olamazdı. Ancak belli seçili yörüngelerde çevre uzunluğu dalga boylarının tamsayı katı olmalı ve dalga çevresinde bir veya birkaç yolculuk yaptıktan sonra kendisini yapıcı bir şekilde pekiştirebilmeliydi. Bu, diyordu de Broglie, atom içerisinde neden sadece belirli yörüngelere izin verildiğini açıklar. Yörünge üzerindeki elektron, gitardaki sadece belirli seçili dalga boylarında titreşmesi mümkün olan gerili tel gibi olmalıydı. Atomdaki öbeklenme böylelikle, müzik aletlerindeki titreşim frekanslarının öbeklenmesi kadar gizemsiz bir biçimde ele alınabilirdi.



Dalga kendisiyle yıkıcı biçimde girişime uğruyor.

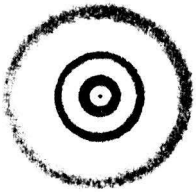


Dalga yapıcı biçimde kendisini pekiştiriyor

Şekil 43: De Broglie'nin dalganın kendisiyle girişime uğraması düşüncesi.

De Broglie bu gerekçelendirmesini hidrojen atomundaki dairesel yörüngelere uyarladığında, hidrojen atomuna ilişkin deney yoluyla öğrenilmiş olan enerjilerle tam bir uyuşma buldu. En düşük enerji durumu veya "taban durumu" bir dalga boyunun dairenin çevresine gerilmiş olduğu durumdu; birinci uyarılmış durumda iki dalga boyu dairenin çevresine gerilmişti; sonraki durumda üç dalga boyu ve böyle devam etmekteydi. Yakın zamanda geliştirilecek olan kuantum mekaniği bu atom resmini alt üst etti, ancak tamamıyla değil. De Broglie'nin atomların içerisindeki kendisini pekiştiren dalgalar düşüncesi, devrimden sonra da hayatta kaldı. Yine de büyük değişiklikler vardı. En büyüğü, belki de, elektrona artık bir dalganın eşlik ettiği bir parçacık olarak bakılmamasıydı. Aksine elektron sadece bir yörünge boyunca gerilmiş olmayan, atomun içerisindeki tüm üç boyutlu mekâna dağılmış olan bir *dalgadır*. Dolayısıyla elektron dalgasının salınımı sadece çekirdeğin çevresinde değil, aynı zamanda merkezden çevreye doğru, çekirdekten uzağa ve çekirdeğe doğru, içeriye ve dışarıyaydı; dönel titreşimlerle içeri-dışarı titreşimlerin bir bileşkesi olabiliyordu.

Örneğin Şekil 44 bir hidrojen atomunda dördüncü durum (üçüncü uyarılmış durum) için elektron yoğunluğunun (aslında elektron olasılığının) iki olası dağılımını göstermektedir. Gölgeli alanlar, bir şey (yüksek enerjili bir X-ışını gibi) dal-



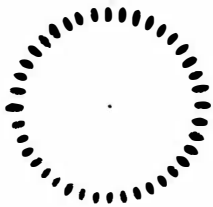
Resim 44: Hidrojen atomunda üçüncü uyarılmış durumda olası iki dalga dağılımı, birinde elektron merkezden çevreye doğru yayılıyor, diğerinde elektron çekirdeğin etrafında dönüyor.

ganın ortasında bir parçacık arayışıyla atomu yokladığında, elektronun nerede bulunmasının daha mümkün olduğunu göstermektedir. Üstteki şekilde yüksek yoğunluklu alanlar, (tam çekirdekte yoğunluğun tepe noktasında olduğu) eşmerkezli dairelerdir. Bu hareket durumu birdir ve açısal momentumu sıfırdır; anlamı elektronun çekirdek etrafında dönmek yerine, radyal olarak ileri ve geri, çekirdekten uzağa ve yakına hareket ederken zihinde canlandırılabilir olmasıdır. Bunu durgun bir suya bir çakıl taşı atıldığında, su yüzeyinde dalgaların merkezden çevreye doğru yayılmasına benzetebiliriz. Bu tip bir dalganın yayılma yönü merkez çevresinde değil, merkezden uzağa doğrudur.

Alttaki şekil ise aksine, bu enerjide mümkün olan en yüksek (üç birimdir) açısal momentumlu hareket durumu için dalga resmini gösteriyor. Bu desen, çekirdek çevresindeki dairesel harekete tekabül etmektedir ve dolayısıyla de Broglie'nin orijinal fikrine uymaktadır. Daire çevresindeki dört tam dalga boyunun bir örneğidir. Şekilde dört değil sekiz koyu alan görmenizin nedeni, dalga boyu başına iki tepe noktası olması, yoğunluk tepe noktasının dalganın her bir maksimumunda olduğu gibi, her bir minimumunda da oluşmasıdır. Şekilde koyu alanlar belirli bir erimde yoğunlaşmış olsalar da, onlarda da bir miktar içeri-dışarı yayılma olduğuna dikkat ediniz. Bir dalgayı hiçbir zaman tamamen yakalayamazsınız.

Bu şekillerin enerji öbeklenmesi ile ilişkisine dair birkaç söz edersek; içeri-dışarı biçimde veya çevresinde iki veya üç

Resim 45: Hidrojen atomundaki bir elektronun yirminci durumda yüksek açısal momentumla dönen dalga dağılımı.



veya dört dalga boyu olabilir; ancak hiçbir zaman iki-tam-bir-bölü-üç veya dört-buçuk dalga boyu olmaz. Dalga boylarının tamsayı olması sınırlaması yüzünden, sadece belli enerji değerlerinin alınabilmesine dönük bir sınırlama sözkonusudur ve bu da de Broglie'nin orijinal varsayımlarıyla uyumludur.

Uyumluluk ilkesini tartıştığımız Soru 3'e dönersek, Niels Bohr'un öne sürdüğü fikre göre, bir kuantum özelliğinin bir durumdan diğerine geçerken küçük bir kısmı değiştiğinde, kuantum davranışı klasik davranışı dikkatle taklit eder. Şekil 45'te bu, hidrojen atomunun yirminci durumunda, bu enerjide mümkün olabilecek en yüksek açısal momentumla ortaya çıkan elektron yoğunluğu deseni biçiminde gösterilmiştir. Çok açık biçimde bir dalganın, atom çekirdeğinin uzağında dairesel bir yol izlediğini görüyorsunuz. Dairenin çevresindeki yirmi tam dalga boyuna denk düşecek şekilde kırk yoğunluk tepesi ve yörünge ile çekirdek arasında epey bir boş mekân da (aslında *neredeyse* boş mekân) vardır. Yoğunluk birbirine radyal olarak kenetlenmiştir ve desen klasik bir dairesel yörüngeye benzemeye başlamıştır; yine de kesin söylersek halen açık bir dalga deseni göstermektedir. Çekirdeğe biraz yaklaşırsak yörüngesi etrafında on dokuz dalga boylu izin verilmiş hareket durumu ve çekirdekten biraz uzaklaşırsak yörüngesi etrafında yirmi bir dalga boylu izin verilmiş hareket durumu vardır. Her biri kendi enerjisine sahip olan bu izin verilmiş yörüngeler her ne kadar oldukça belirgin biçimde yüzdesel olsalar da, aralarında dağlar kadar fark yoktur ki, bu da yine uyumluluk ilkesini gösterir, çünkü klasik olarak bir yörünge herhangi bir yarıçapı alabilir.

67. Dalgaların atomların boyutlarıyla bağlantısı nedir?

Bir elinizde bir proton, diğer elinizde bir elektron olduğunu hayal edin. Bu ikisini aralarında belli bir mesafe ve sadece boş mekân olacak şekilde serbest bırakıyorsunuz. Ne olur? Bir elektrik kuvvet tarafından birbirlerine doğru çekilirler (çünkü farklı yükler birbirini çeker). Klasik açıdan baktığımızda; elektron ya doğrudan protonun içine dalar ya da giderek küçülen döngülerle etrafında döner ve bu esnada enerji yayar. Bu klasik beklenti, bir bilyeyi bir kâsenin içerisine bıraktığınızda olacaklardan farklı değildir. Bilye ya doğrudan aşağıya yuvarlanacak ve en sonunda sürtünme enerjisini dağıttığı için merkezde duracak, ya da aşağı doğru dönerek ilerleyecek ve hareketi yine merkezde sona erecek. En düşük enerji noktasını bulmuş olacak. Eminim elektron da aynısını yapmak "isterdi", ancak dalga doğası bunun karşısında bir engel oluşturmakta. Elektron çekirdeğin yörüngesinde ona doğru yaklaşarak döndükçe, dalgası da giderek daha kısa bir dalga boyuna "çekilir". De Broglie sahneyi alır. Daha kısa dalga boyu, daha büyük momentum demektir. Elektronun yayıldığı alan küçüldükçe, dalga boyu da kısalır ve momentumu arttığı için elektron daha hızlı hareket eder. Dalga boyu ile momentum arasındaki *ters* ilişkinin büyük önemini görüyorsunuz.

Momentum arttıkça hareket enerjisi artar. Elektronun hapsedildiği alan küçüldükçe, hareket enerjisi büyür. İtici bir kuvvet, çekici elektrik kuvvete karşılık veriyor gibidir. Enerji terimleriyle konuşursak, iki rakip etki sözkonusudur. Elektron çekirdeğe yaklaştıkça, elektriksel çekim (*potansiyel*) enerjiyi düşürür, aynı anda elektronun dalga doğası (*kinetik*) enerjiyi arttırır. İki etki toplam enerjinin minimum olduğu bir noktada dengelenir. Bu noktada hareket enerjisi etkisi ağır basıyorsa çekirdeğe doğru ilerlemek, potansiyel enerji etkisi ağır basıyorsa çekirdekten uzaklaşmak toplam enerjiyi arttırır. Tekil bir elektron ve proton için bu denge noktası, yaklaşık 10^{-10} metrelik (bir nanometrenin onda biri) bir uzaklıktır ve protonun boyutlarından yüz bin kere daha büyük olmasıyla, alışılagelen parçacık standartlarına göre de çok büyük bir mesafedir. Mad

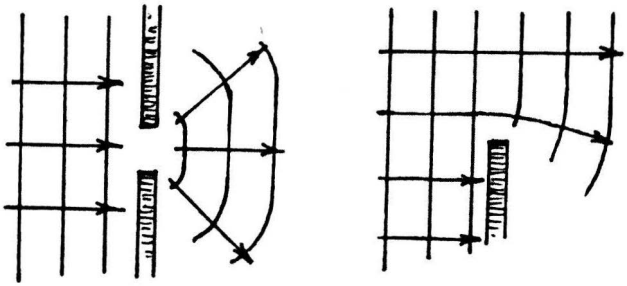
denin dalga özelliği sağ olsun; atomlar proton, nötron, pion gibi bileşik parçacıkların boyutlarıyla karşılaştırıldığında "dev" büyüklüktedirler.

Atomun göreli büyük boyutuyla baş etme açısından, elektronun kütlesinin küçüklüğü de bir rol oynar. Momentum kütle ve hızın ürünüdür; dolayısıyla sadece düşük hız değil, düşük kütle de dalga boyunun büyümesine katkı sağlar. Elektron başka herhangi bir parçacığa göre (foton ve nötrinolar hariç) çok daha düşük kütleli olduğu için, diğer parçacıklarla karşılaştırıldığında tipik biçimde daha az momentuma ve daha büyük dalga boyuna sahiptir ve de daha fazla yer işgal eder. (Nötron bu kurala bir istisna oluşturur. Öyle çok yavaşlatılabilir ki, büyük kütlesine rağmen büyük bir dalga boyuna sahip olabilir ve daha önce belirttiğim üzere, kendisini birkaç atomun işgal edeceği genişlikte bir alana yayabilir.)

Elektronun dalga doğası ve atomların boyutlarına ilişkin yanıtlamamız gereken iki soru daha var. Biri, ağır atomların çok daha büyük elektriksel çekim kuvvetine sahip olmalarına rağmen neden hidrojen atomunun boyutlarından çok daha küçük bir boyuta düşmedikleri sorusu. İkinci soru, uyarılmış durumdaki bir atomun taban durumuna oranla niçin epey büyük olduğu. 31. Soru içerisinde verdiğimiz yanıtları burada açalım.

Örneğin bir uranyum çekirdeğinin yakınındaki *tekil* bir elektronun kaderini ele alalım; bu elektron en az enerji noktasını, denge noktasını çekirdeğe (hidrojen atomunda olduğundan) çok daha yakın bir yerde bulacaktır. Ancak giderek daha fazla elektron eklerseniz, ortalama olarak giderek azalan güçte bir kuvvet hissedeceklerdir. Uranyum çekirdeğindeki doksan ikinci elektron, doksan iki proton tarafından içeriye doğru çekilirken, diğer doksan bir elektron tarafından dışarıya doğru itilir. Üzerindeki net çekim yaklaşık olarak hidrojen atomundakiyle aynıdır ve bu son elektron boyut açısından hidrojen atomundakinden çok farklı olmayan bir hareket durumuna yerleşir.

Uyarılmış atomların taban durumundaki atomlardan neden büyük olduğuna gelirsek: Dalga, en düşük durumundaki bir elektronda, sadece bir salınım döngüsüne sahiptir. Hareket durumunun boyutunu belirleyen oyluma sadece bir kez yük-



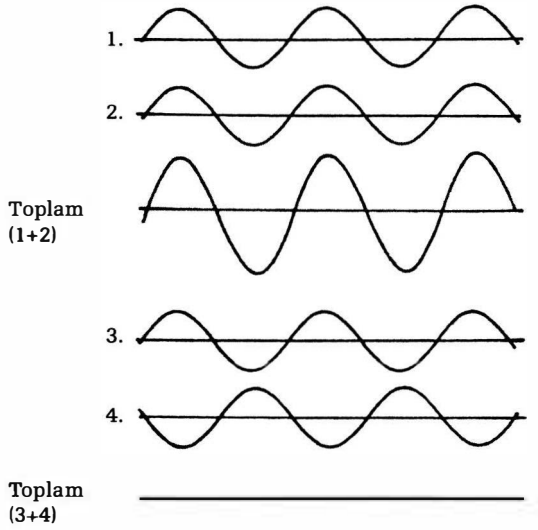
Şekil 46: Bir aralıktan veya bir köşeden geçen dalgalar kırınıma uğrar.

selir ve düşer. Uyarılmış bir durumdaysa, elektron dalgası iki veya daha fazla salınım döngüsü geçirir. Dolayısıyla uyarılmış durum dalgası, çoklu salınım döngülerini tamamlamak için daha fazla hareket alanına gereksinim duyar. Aşırı bir basitleştirme oldu, ancak genel fikir budur. Eğer uyarılmış durum dalgasının boyutları, çok sayıdaki salınımıyla birlikte, taban durumu dalgasının boyutları kadar küçültülmüş olsaydı, daha kısa bir dalga boyuna, daha büyük bir momentuma ve daha büyük bir hareket enerjisine sahip olurdu. Toplam enerjisini ondan sonra düşürebilir ve denge noktasını daha büyük bir boyuttayken bulabilirdi.

68. Kırınım nedir? Girişim nedir?

Dalgalarda esasen hatları belirsiz olan, "bulanık" bir şey var. Beyzbol toplarının veya uzay aracının güzergâhı gibi net tanımlanmış yolları izlemiyorlar. Uzayda bir bölgeyi işgal ediyorlar, iyi tanımlanmış sınırları yok, ilerlerken yayılıyorlar ve üst üste gelebiliyorlar.

Bir dalga, bir aralıktan veya bir köşeden geçtiğinde bükülür (Şekil 46). Buna *kırınım* denir. Kırınımı, denizde demir atmış bir gemiyi aşan dalgalarda görebilir veya kablosuz telefonunuzun genellikle baz istasyonu ile sizin aranızda bir bina varken de çalışıyor olması gerçeğinden hareketle dolaylı biçimde tecrübe edebilirsiniz. Kırınım etkisi büyük dalga boylarında daha bariz görülür ve bu, kısa dalga boyundaki FM'e oranla, uzun dalga boyundaki AM radyo sinyallerinin engelleri



Şekil 47: Dalgaların yapıcı ve yıkıcı girişimi

aşmakta nasıl daha başarılı olduklarını açıklar. Büyük bir şehrin alçak noktalarında araba sürerken AM istasyonlarını FM'e oranla biraz daha rahat bulursunuz.

Dalgalar üst üste düştüklerinde (Şekil 47) bir olasılık tepe ve çukurları denk gelecek şekilde hizalanmalarıdır. O zaman dalgalar birbirini büyütür ve toplam sonuç daha büyük genlikte bir dalga olur. Veya tepe çukura, çukur tepeye denk gelecek şekilde hizalanabilirler, bu durumda birbirlerini silebilirler (eğer eşit yoğunluktaysalar) ya da her ikisinin eski halinden de düşük genlikte yeni bir dalga üretebilirler. Veya bunların arasında bir şey olabilir. Fizikçiler bu olasılıkların tümüne *girişim* adını verirler. Girişim, "yıkıcı" olanla "yapıcı" olan arasında uzanır.

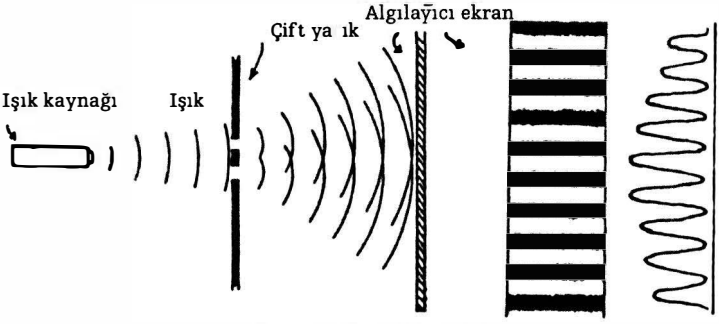
Işığın dalga karakteri taşıdığı kesin olarak tespit edilmeden çok öncesinde de, bazı dalgalarda, özellikle su dalgalarında kırınım ve girişim gerçekleştiği bilinmekteydi. 1801'de ışığın kırınım ve girişimini gözleyen Thomas Young ışığın parçacıklardan değil, dalgalardan oluştuğunu kesin olarak ilan etti. Veya öyle olduğu düşünüldü diyelim. Dalgalar kırınım ve girişime uğrayabilir, parçacıklarsa uğramaz diye gerekçelendirme

devam ediyordu. Dalgaların hakkını teslim etmek için, parçacıkların bu şekilde davranmasının nedeninin dalga karakteri taşımalarından kaynaklandığını söyleyebiliriz. De Broglie bu noktada haklıydı.

69. Çift yarık deneyi nedir? Neden önemlidir?

Young ışığın kırınım ve girişimini sergilerken opak bir ekrandaki iki delikten faydalandı. Bugünse daha fazla ışık (veya foton) geçişine izin veren yarıkları kullanıyoruz. Çift yarık deneyinin mantığı Şekil 48'de gösterilmiştir. Tek bir dalga boyuna sahip olan bir ışık (monokromatik ışık), birbirine yakın yerleştirilmiş iki dar yarığı olan bir ekranı aydınlatıyor. Kırınım yüzünden ışık, dedektör ekranında basitçe iki yarığın görüntüsünü yansıtmıyor. Bunun yerine her bir yarıktan geçen ışık değişik yönlerde bükülüyor ve algılayıcı ekrandaki geniş şeride yayılıyor. Algılayıcı ekrandaki verili bir nokta ışığı her iki yarıktan da alıyor ve böylelikle girişim olanağı doğuyor.

Algılayıcı ekrandaki iki yarık arasındaki orta noktaya tam zıt yerde bulunan nokta, iki yarıktan da eşit derecede uzakta yer alıyor. Bu, bu noktada iki yarıktan gelen ışığın "fazda" olduğu, tepe ve çukurlarının birbirine denk geldiği anlamına geliyor. Sonuç, yapıcı girişimdir. Bu nokta, parlak bir ışık şeridini ortaya çıkarır. Ekranda bu noktadan biraz daha yukarı kayılırsa, alttaki yarıktan uzaklığın yukarıdaki yarıktan uzaklıktan tam olarak yarım dalga boyu daha büyük olduğu bir noktaya erişilecektir. Bu noktada dalgaların tepesinin çukuruna, çuku-



Resim 48: Çift yarık deneyi

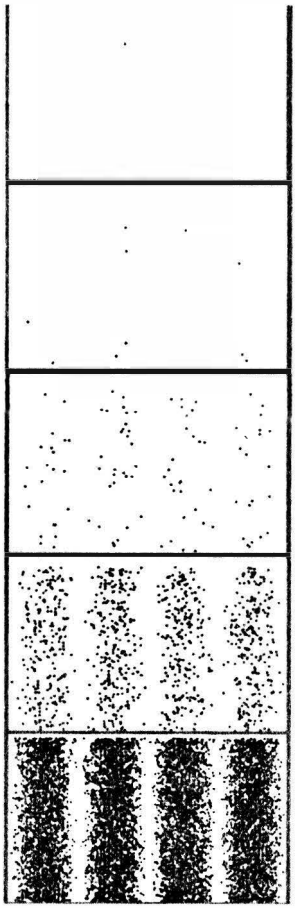
runun tepesine denk geldiği yere erişilir. Sonuç, yıkıcı girişimdir. Orada da koyu bir şerit belirir. Biraz daha uzağa ilerlenirse, alttaki yarıktan uzaklığın üstteki yarıktan uzaklıktan tam bir dalga boyu daha büyük olduğu noktaya gelinir. Yine yapıcı girişim. Yine parlak ışık şeridi.

Böyle devam eder. Toplam sonuç, kırınım ve girişimin açık kanıtı niteliğinde, paralel sıralanmış bir parlak ve koyu şeritler dizisidir. [Şeritlerin aralıklarının ölçümü ve yarıklar arasındaki mesafeyle algılayıcı ekrandan uzaklıklarının bilinmesi sonucunda ışığın dalga boyu hesaplanabilir. Daha büyük dalga boyuna sahip ışık (örneğin kırmızı), daha kısa dalga boyuna sahip ışığa göre (örneğin mavi) daha geniş biçimde birbirinden ayrılmış şeritler üretir.]

Bu deney, kaynak ile algılayıcı ekran arasında aynı anda bir fotondan başka bir şeyin olamayacağı derecede zayıf bir ışık kaynağı ile gerçekleştirilmiştir. Aynı deney elektronlarla, hatta atomlarla bile yürütülmüştür. Sonuç hep aynı çıkmıştır. Açık ve koyu şeritlerden oluşan sonuç deseni, kırınım ve girişimin gerçekleştiğini ve bireysel parçacıkların bize bir dalga boyu sunduklarını göstermektedir.

Bazı fizikçiler çift yarık deneyinin, kavramsal açıdan böylesine basit olmasına karşın, dalga-parçacık ikiliğini bu kadar güçlü vermesinden kaynaklı, mükemmel bir kuantum deneyi olduğunun altını çizerler. Örneğin deneyin her-seferinde-bir-foton versiyonunu düşünün. Bir foton aletten geçer ve algılayıcı ekranda bir yere iniş yapar. Ama nereye? Nereye ineceğine nasıl "karar verir"? Bu sadece olasılıkla belirlenir. İyi iniş yapabileceği yerler vardır, iniş yapma ihtimali daha zayıf olan yerler vardır, inme olanağı olmayan yerler vardır. Şekil 49 bir, on, yüz, bin ve en sonunda on bin fotonun iniş yerlerine dair bir benzetim sunmaktadır (her panele üstündeki panelin sonuçları dâhil edilmektedir).[69] On fotona kadar herhangi bir desen fark edilmemektedir. Noktalar rasgele görünmektedir. Yüz fotonda

69 Benzetim her gerçekleştirildiğinde sonuçlar farklı çıkmaktadır. Başka bir denemede üst paneller (bir ve on foton) çok daha farklı, orta paneller (yüz ve bin foton) biraz farklı ve en alt panel (on bin foton) hemen hiç farksız görünecektir.



Şekil 49: Fotonların (veya başka parçacıkların) bir çift yarıktan tek tek geçecek şekilde ateşlendikten sonra ekranda algılandıkları noktaların benzetimi. Beş panel sırasıyla bir, on, yüz, bin ve on bin parçacık için sonuçları göstermektedir. Her panel kendisinden önceki panelin sonuçlarını kapsamaktadır. Alt paneldeki dar çizgiler piksel boyutuyla bağlantılıdır.

daha koyu ve daha açık şeritlerden oluşacak bir desen görülmeye başlanır. Bin fotonda desen daha belirgin hale gelir ve on bin fotonda desen yapıcı ve yıkıcı girişimin açık ve koyu şeritlerine dönük klasik beklentiyi karşılar.

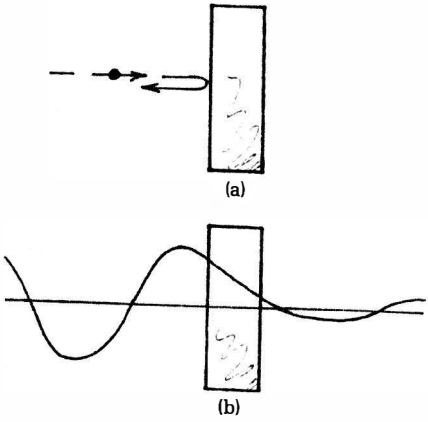
Her-seferinde-bir-foton deneyinin sonucunu nasıl yorumlamalıyız? Her bir foton ineceği ve inmeyeceği yeri nasıl bilmektedir? Diğer fotonların daha önce indikleri yerleri bilir mi? Bir foton bir yarıktan geçtiğinde, diğer yarığın orada olduğunu nasıl bilir (çünkü bir yarık açık olsaydı desen çok daha farklı olurdu)? Einstein kuantum fiziğine "hayaletli" demişti. Richard Feynman çift yarık deneyinin kuantum fiziğinin ruhunu yansıttığını ifade etmişti. Deneyi yorumlamanın sadece bir yolu var gibi gözüküyor: Her foton her iki yarıktan da geçen ayrı bir dalga olarak, daha önce geçen fotonlardan tamamen bağımsız biçimde ve sadece o dalgayla bağlantılı bir olasılıkla hareket eder.

Çift yarık deneyinin bize öğrettiği (ve sayısız başka deneyin de onay verdiği) şey, bir fotonun parçacık olduğu fikrinden doğum ve ölüm anları haricinde - vazgeçmek zorunda olduğumuzdur.

70. Tünelleme nedir?

Daha önceki soruları cevaplarken *tünelleme* dediğimiz, bir parçacığın klasik fiziğe göre aşılamaz olan bir engeli aşabildiği olguya dikkat çekmiştim. Engel aşma; alfa bozunumunda, nükleer bölünmede, nükleer birleşmede ve modern bir süper mikroskop olan tarama tünelleme mikroskobunda önem taşımaktadır. Maddenin dalga doğası bize tünellemeyi anlamak için bir yol sunmaktadır.

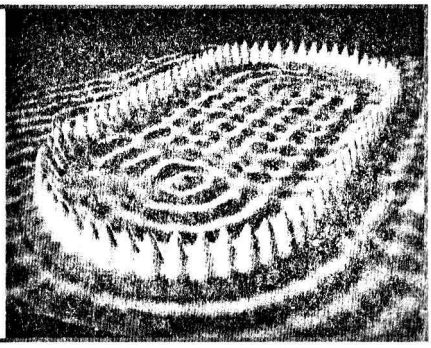
Şekil 50'de bir potansiyel enerji duvarı, bir çeşit cezaevi duvarı gösterilmektedir. Sol tarafındaki parçacığın duvarın üstünden aşmaya yetecek hareket enerjisi yoktur. Klasik açıdan, şeklin (a) bölümünde gösterildiği üzere parçacık duvardan seker ve bunu belli bir sayıda tekrarlayabilir. Hiçbir zaman içinden geçemez. Sonsuza dek hapsedilmiştir. Ancak kuantum mekanik açıdan yaklaşırsak durum biraz daha farklıdır, çünkü şeklin (b) bölümünde gösterildiği gibi parçacığın dalgası duvarın içinden geçebilir. Duvarın yüksekliğine ve parçacığın kütlesine bağlı olarak, içeride pek az yol alarak dalga, hızlı bir biçimde henüz duvarın içerisindeyken yok olabilir (gerçek bir mahkûmun gerçek bir cezaevinde havalandırmada duvara gelişigüzel yaslanarak kaçabilmesi mümkün değildir). Ama duvar çok yüksek değilse (enerji açısından) ve çok kalın değilse, parçacığın dalgası duvardaki yolu içeriden aşabilir ve duvar dışında kuyruğunun bir



Resim 50: (a) Klasik açıdan, bir parçacık içinden geçilmez bir duvara çarpıp seker. (b) Kuantum mekanik açıdan, parçacığın dalgası duvarın içinden geçebilir.

kısmını görünür kılar. Duvarın diğer tarafındaki bu dalga parçası parçacığın diğer tarafta kendisini göstermesi için gerçek bir olasılığa işaret etmektedir, duvardan kelimenin tam manasıyla geçebileceğini göstermektedir.

Fizikte sıkça olduğu gibi, saf fizik ortamında (alfa bozunumu) keşfedilen bir olgu pratik uygulamaya da aktarılmıştır. 1982 yılında Zürih, İsviçre'deki IBM laboratuarında araştırmacı olarak çalışan Gerd Binnig ve Heinrich Rohrer[70] tarafından tamamlanan tarama tünelleme mikroskobu veya STM, tünellemenin kullanım örneklerinden biri olmuştur. Aletlerinde minik bir metal uç, katı bir yüzeyin yakınına getirilmiştir (*çok* yakınına, bir nanometre veya 10^{-9} m yakınına). Yüzeyle uç arasına bir elektrik voltajı uygulanmıştır. Klasik açıdan yaklaştığımızda bu ikisi arasından akım geçmez, çünkü hava çok iyi bir yalıtkandır. Ancak o hava tabakası elektron dalgaları tarafından ihlal edilebilen bir enerji duvarıdır. Uçtan katı yüzeye doğru küçük bir dalga "sızıntısı" vardır ve küçük bir "tünelleme akımına" neden olur. Duvar ne kadar inceyse, bir diğer deyişle uç ile yüzey arasındaki uzaklık ne kadar azsa, tünelleme akımı o kadar büyük olur. Pratikte, bir geri besleme devresi aracılığıyla uç aşağı yukarı hareket ettirilir ve böylelikle yüzeyin daha üstünde yatay bir yol bağlantısı kurarken, yukarı-aşağı hareketinin miktarı sabit bir tünelleme akımını koruyacak, yani yüzeyden sabit bir uzaklıkta olacak şekilde ayarlıdır. Böylelikle uç yüzeydeki minik tepe ve vadileri tespit etmektedir. Fotoğrafta görüldüğü üzere tek bir atomun çapından çok daha küçük uzaklıkları ölçebilmektedir.



Demir atomlarınca çevrilmiş bakır bir yüzeyin STM görüntüsü.

70 1986 yılında hızlı biçimde Nobel Ödülü verilen bir başarı olmuştur.

XII. Bölüm

Dalgalar ve Olasılık

71. Dalga fonksiyonu nedir? Schrödinger denklemi nedir?

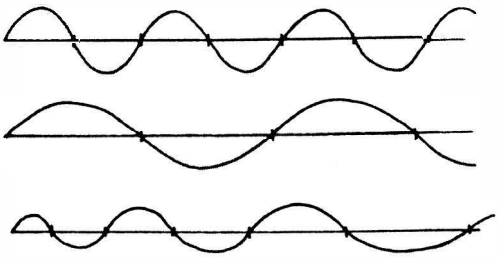
Kuantum fiziğinde olasılığın rolüne; örneğin bir elektronun bir atom içerisinde farklı yerlerde bulunma olasılıklarına, çift yarıktan geçen bir fotonun farklı noktalara ulaşma olasılığına vs daha önce değinmiştik. İşte bu olasılığı kontrol eden şeye *dalga fonksiyonu* adını veriyoruz. Dalga fonksiyonu genliği belirtmektedir; *genlik* bir dalganın sıfır değerinden pozitif veya negatif yönde ne kadar saptığının ölçüsüdür. Bir örnek olarak bunu, su yüzeyinin bir dalga geçerken normal düzeyinden aşağıya ya da yukarıya doğru belli ölçüde sapmasına benzetebiliriz. Ancak kuantum dalgası ile sudaki dalga arasında önemli bir farklılık vardır. Kuantum dalgası kendi başına ölçülebilir bir nicelik değildir. Olasılık ise, ölçülebilen bir nicelik özelliği taşır ve o da kuantum dalgası genliğinin *karesidir*. Üstüne üstlük kuantum dalgası genliği, reel ve sanal bölümleri olan

bir *karmaşık sayı* da olabilir. Sonuç olarak olasılık, genliğin *mutlak karesine* eşittir; reel bir sayıdır ve ölçülebilir bir niceliktir. Bundan sonraki bölümlerde bu teknik ayrıntı üzerinde durmayacağız, genliğin karesinin olasılığı verdiğini söylemek bizim için yeterli.

Olasılık belirsizliğe, kesin bilgi yoksunluğuna işaret eder. Gerçekten de belirsizlik kuantum fiziğinin alamet-i farikasıdır. Bir de buna kesinsizlik eklenir. Belli bir hareket durumundaki bir hidrojen atomunda yer alan bir elektronun dalga fonksiyonu, her noktada kusursuz şekilde iyi-tanımlanmış bir değere sahiptir. Onun karesi, olasılık da kusursuz biçimde kesindir. Ve de bu kesinlik atomdan atoma genişler. Bin hidrojen atomu aynı hareket durumundaysa, hepsinin dalga fonksiyonları özdeş olduğu gibi, olasılık dağılımları da özdeştir. *Kesin olmayan*, bir parçacık olarak elektronun tam yerini belirlemek için bir deney düzenlenirse nerede bulunabileceğinin önbilgisidir; bunu önceden kesin biçimde bilemiyoruz. Bin atom üzerinde yapılan bin özdeş deney, bize elektronun yerini bin değişik yerde verebilir. Bu bir çift zar atmaya benzer. Bir sonucu elde etmenin olasılığını tam olarak (zarlar kurallara uygun ve dengeliyse) bilirsiniz (yedi için 1/6, bir-bir için 1/36 vs), ancak bir zar atışının sonucunu asla önceden bilemezsiniz.

1925 yılının sonlarına doğru, de Broglie'nin maddenin dalga doğasını ortaya koymasından bir yıldan biraz fazla bir süre geçmişken, Erwin Schrödinger adında çok yönlü bir Avusturyalı fizikçi, bugün halen kendi ismini taşıyan bir denklemle sahneye çıktı. Bu dalga fonksiyonunun hesaplanmasını hem hidrojen atomunda hem de ilke olarak tüm sistemlerde mümkün kılan bir denklemdi.[71] Yeni kuantum mekaniğinin mimar-

71 Bir boyutta hareket eden bir parçacık için Schrödinger denklemi şöyle bir şeydir:
$d^2\psi/dx^2 + (2m/\hbar^2)[E - V]\psi = 0$.
Bu basit görünen denklemde büyük bir güç saklıdır. Denklemdeki Y dalga fonksiyonu, *x* hareket yönündeki pozisyon koordinatı, m parçacığın kütlesi, ħPlanck sabiti bölü 2π, V parçacığın potansiyel enerjisi ve E toplam enerjidir. Schrödinger'in bu denklemi bir kadın arkadaşıyla beraber Arosa, İsviçre'de bir kış tatili esnasında bulmuş olması, rahatsız etmiştir.

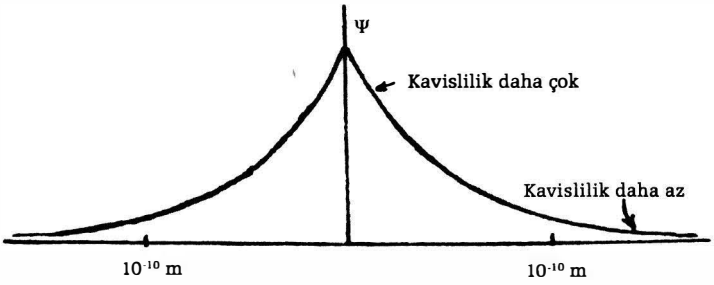


Şekil 51: Dalga boyu kısa olan dalgalar, uzun dalga boyu olanlara göre daha kavislidir. "Kavislilik" bir dalganın belli bir noktadaki dalga boyunu tanımlayabilir.

ları içerisinde Schrödinger, denklemini ortaya attığında otuz sekiz yaşında olduğu için "epey yaşlı" sayılabilir.[72]

Schrödinger denkleminin yaptığı, de Broglie'nin momentum ile dalga boyu arasındaki bağlantı fikrini, parçacığın momentumunun ve dolayısıyla dalga boyunun her bir yerde sürekli farklılaştığı durumlara doğru genelleştirmektir. İlk bakışta bir dalganın bir yerde bir dalga boyuna sahipken, biraz farklı bir yerde farklı bir dalga boyuna sahip olması mümkün değilmiş gibi görünür. Dalga boyu, doğası gereği, yayılan bir şey olarak düşünülür. Denizdeki dalganın veya titreşen bir tel ya da hava kolonunun dalga boyu, bir tepeden diğerine olan uzaklıktır. Ama aslında çok küçük bir mesafedeki dalga boyunu dalganın "kavisliliğiyle" tanımlamak mümkündür. Şekil 51'de gösterildiği üzere, kısa bir dalga boyuna sahip dalga daha kavisliyken, uzun dalga boyu olan ise daha az kavislidir. Dalga boyu ile momentum arasındaki ters ilişkiyi hatırlarsak, bu bir parçacığın momentumu büyükse çok kavisli bir dalga fonksiyonuna, momentumu küçükse daha az kavisli bir dalga fonksiyonuna sahip olduğu anlamına gelir.

72 1925 yılında diğer önemli kuantum fizikçileri kaç yaşındaydılar: Paul Dirac ve Samuel Goudsmit yirmi üç, Werner Heisenberg ve Enrico Fermi yirmi dört, Wolfgang Pauli ve George Uhlenbeck yirmi beş, Louis-Victor de Broglie otuz üç. O yıl Niels Bohr kırkına, Albert Einstein'sa kırk altı yaşına basmıştı.



Şekil 52: Hidrojen atomu dalga fonksiyonunda dalga boyu değişkenliği.

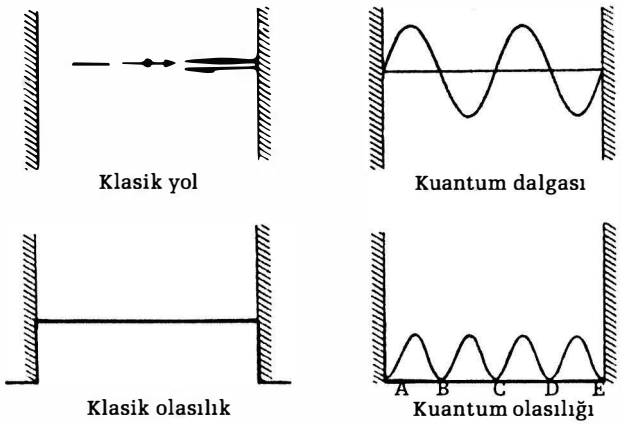
De Broglie'nin öne sürmüş olduğu bir dalganın dışa doğru dairesel bir yörünge çevresinde yayılabileceği görüşünün değeri teslim edilebilir, çünkü, dünyanın etrafında dairesel bir yörüngede hareket eden uyduya benzer şekilde, dairesel bir yörünge izleyen bir elektronun hızı ve momentumu sabittir. Dolayısıyla sabit momentumlu elektron, değişmeyen bir dalga boyuna sahip olabilir. Peki, elektron çekirdeğin çevresinde dönmeyip doğrudan çekirdeğin üzerine doğru veya çekirdekten dışarıya doğru hareket ediyorsa ne olacak? Elektron çekirdeğe doğru çekildikçe momentum kazanarak hızlanır. Dolayısıyla dalga boyu (çok büyük mesafelerden uzaklaşarak çekirdeğin kısa mesafelerine doğru yakınlaştığı için diyelim), artan oranda kısalır. Schrödinger denklemi burada devreye girer. Denklem bu tip (sıfır açısal momentumlu) bir hareket için, Şekil 52'de özel taban durumu için gösterildiği üzere bir çözüm sunmaktadır. Grafik, dalga fonksiyonunun çekirdeğe yaklaştıkça kavisliliğinin arttığını, uzaklaştıkça azaldığını göstermektedir.

Şekil 52'de dalga fonksiyonunun iki özelliği daha görülebiliyor: Önce düşük bir değerden yüksek bir değere doğru artıyor, sonra tekrar düşük bir değere doğru azalıyor; böylece atomun bir tarafından diğer tarafına tam bir salınımın yarı-çevrimini sergilemiş oluyor. Bu yaklaşık olarak 0,2 nm (2×10^{-10} m)'lik ortalama bir dalga boyu sergilediği anlamına geliyor. Böylece elektron bu durumda yaklaşık olarak yine ortalama bir momentum ortaya koyuyor. İkinci olarak, elektronun dalga doğası

onun asla basit bir yol izleyemeyeceği, ya dairesel ya da içeri-dışarı bir yol izleyeceği anlamına geliyor. Elektronun dalgası her zaman dışa doğru yayılmıştır. Şekil 52'de gösterilen özel hareket durumu için de, her bir düz-çizili radyal yönün diğerleriyle eşdeğer olduğu bir bulanık topu gözünüzün önüne getirmeniz gerekiyor. Elektronun dalga fonksiyonu topun dış yüzeyinin etrafında küçük bir değere sahiptir, topun merkezine doğru ilerlendikçe artar. Bir yön ile diğeri arasında fark yoktur.

72. Dalgalar olasılıkları nasıl belirler?

Bir parçacığı bir yerde bulma olasılığının o noktadaki dalga fonksiyonunun karesi olduğunu belirtmiştik. Basit bir hareket örneğini düşünelim: Bir parçacık, içerisinden geçilemeyen iki duvar arasında sabit bir hızla ileri-geri sekmektedir. Bu hareketin klasik görünümü Şekil 53'ün sol panelinin üst ve alt bölümlerinde gösterilmiştir. Klasik şekilde bile olasılık görülebilmekte ve resmin içerisine girmektedir. Parçacığın herhangi bir anda nerede olduğunu bakıncaya dek tam olarak bilemezsiniz. Bu *habersizlik olasılığıdır* (27. sorunun yanıtında bu terimle karşılaşmıştık). Parçacık kesinlikle bir yerlerde, ancak siz yerini bilmiyorsunuz. Sadece her yerde eşit olasılıkla ola-



Şekil 53: Bir kutudaki parçacığın klasik betimlemesi ile kuantum betimlemesi

bileceğini biliyorsunuz. Parçacığın rasgele yüz kere fotoğrafını çekseniz, onu hareket alanı içerisinde eşit orana yakın biçimde sağda veya solda, yüz farklı yerde bulabilirsiniz.

Sözkonusu hareketin kuantum betimlemesi, oldukça önemli iki yönden klasik betimlemeden ayrışmaktadır: Birincisi, kuantum betimlemeye göre sadece belli enerjilere izin verilir. Enerji "öbeklidir". Duvarlar arasına yarım dalga boyunun veya tam bir dalga boyunun veya bir buçuk dalga boyunun; kısacası yarım dalga boyunun herhangi bir tamsayı katının sığacağı enerjilere izin verilir. Ancak o zaman dalga, çok sayıdaki ileri-geri hareketinde kendisini yapıcı girişim yoluyla güçlendirebilir. Diğer dalga boylarında dalga, ileri-geri yolculuklarında kendisiyle yıkıcı girişime girer ve de Broglie'nin dairesel yörüngelerinde öngörülene uygun olarak kendisini silerek yok eder. Şekil 53'te sağ üst tarafta gösterilen dalga fonksiyonu dördüncü (üçüncü uyarılmış) durumdadır ve duvarlar arasında dört yarım dalga boyuna sahiptir.[73]

Klasik ile kuantum betimleme arasındaki diğer fark, olasılığın sahne alışındaki farklılıktır. Klasik açıdan olasılık –habersizlik olasılığı– bir rol *oynayabilir*, ancak bu zorunlu değildir. Hareket hakkındaki ayrıntılı bilginizin düzeyine bağlıdır. Parçacığın yeri hakkında kesin bir bilgiye sahip değilseniz, parçacığın klasik olasılığı her yerde aynı olmak üzere sabittir. Bu durum grafiksel olarak şeklin sol alt tarafındaki düz yatay çizgi ile betimlenmiştir. Kuantum mekanik açıdan ise olasılık bir rol oynamak *zorundadır*. Kuantum betimlemenin tanımı bunu gerektirir. Şekil 53'teki sağ alt bölüm, çizili durum için olasılık dağılımını göstermektedir. Olasılık, dalga fonksiyonunun karesi olduğu için, hiçbir zaman negatif olamaz (şansımıza). Sıfırdan maksimuma kadar uzanan bir değer aralığına sahip olur. Şeklin belki de en hayret verici özelliği, beş noktada

73 Almanların bu tip bir dalga fonksiyonu için kullandıkları bir kelime var: *Eigenfunktion*. Kimi zaman "muntazam fonksiyon" olarak çevrilmişse de, İngilizcede de frekansla doğrudan "eigenfunction" olarak adlandırılır. 1920'lerde Almanca fiziğin temel dili konumundaydı.

(iki duvarda ve aradaki üç noktada) olasılığın tam olarak sıfır olmasıdır. Bu, parçacığın belirli bazı hareket durumlarında bu noktaların herhangi birinde *asla* bulunamayacağı anlamına gelir. Eğer B, C ve D noktalarında asla bulunamayacaksa, o zaman A'dan E'ye nasıl gidebilecek, diye sorabilirsiniz. Aradaki tüm noktalarda bulunma olasılığına sahip olmaksızın, bir duvardan diğerine olan mesafeyi nasıl kapsamaktadır? İşte kuantum fiziğinde mantıklı bulmasak da kabul etmemiz gereken durumlara bir başka örnek daha. Bu örnekte parçacığı duvarlar arasındaki yolunu gidip gelerek tamamlayan bir varlık olarak düşünemezsiniz. Onun yerine aradaki boşluğu her an doldurmaktadır. Parçacık, bu özgül durumda bir *dalgadır.* Yayılmaktadır. Emin olmak için, parçacığın yerini açığa çıkarmayı hedefleyen bir deney yapabilirsiniz, ancak bunu yaptığınızda o hareket durumunu bozmuş ve yenisini yaratmış olursunuz. Bu durumda bile parçacık A, B, C, D ve E noktalarında görünmeyecektir.

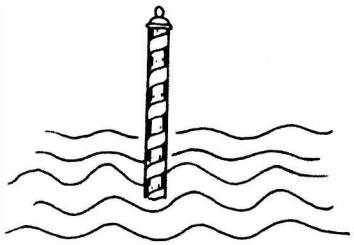
Duvarlar arasındaki parçacık örneği tek boyutludur. Üç boyutta, olasılık hesabı biraz daha karmaşıktır. Örneğin dalga fonksiyonu Şekil 52'de gösterilen bir hidrojen atomunun taban durumunu ele alalım. Bu dalga fonksiyonu merkezde (çekirdekte) tepe noktasına ulaşır. Olasılığa ulaşmak için karesi alınırsa, olasılık da merkezde tepe noktasına ulaşır. Buradan, elektronun yerini saptamak için yapılan bir deneyde, elektronu çekirdek yakınında bulma olasılığının daha yüksek olduğu, onu daha uzakta bulma olasılığının ise giderek azaldığı sonucuna ulaşabilirsiniz. Bu savın rafineleştirilmesi için, merkezin yakınıyla karşılaştırıldığında, uzağında ne kadar daha fazla uzay hacmi bulunduğunu göz önüne almalısınız. Dalga fonksiyonunun karesi, *birim hacim başına* olasılıktır. Aslında çekirdekten belli bir uzaklıktaki ulaşılabilir hacim, çekirdeğin hemen yakınındakinden ne kadar büyükse; elektronu belli bir uzaklıkta bulma şansı, çekirdeğin yakınında bulmaktan o kadar çoktur. Ulaşılabilir hacmi hesaba katan bu rafine olasılık, $0{,}5 \times 10^{-10}$ m civarında tepe noktasına ulaşmaktadır.

73. Dalgalar parçacıkların sabit konuma sahip olmalarını nasıl engeller?

Her ne kadar bir dalga fonksiyonu tekil bir noktada tanımlanabilecek özelliklere (değeri ve kavisliliği) sahip olsa da, dalganın kendisi tek bir noktaya sıkıştırılamaz. Bir dalga, doğası gereği uzayda belli bir alan boyunca yayılır. Küçük bir alana kolaylıkla sıkıştırılamaz. Örneğin, geçirimsiz duvarlar arasında ileri-geri hareket etmeye mahkûm edilmiş parçacığı düşünelim (Şekil 53). Duvarlar birbirine yaklaştırıldıkça, parçacığın hareket aralığı daralır, hapsedilen parçacığın dalga boyu giderek daha fazla kısalır. De Broglie denklemine göre bu parçacığın momentumunun ve dolayısıyla enerjisinin giderek daha fazla artması anlamına gelir. Demek ki, sınırları daraltıldıkça parçacık daha fazla enerji kazanır. Sağa doğru hiç hareket edemeyeceği kadar sıkıştırmak için sonsuz enerji gerektirir. Paradoksal olarak parçacık hiçbir yere gitmeyecek olsa da, sonsuz hareket enerjisine sahip olur. Bunu devinimsiz kılınmış olmasına rağmen, aşırı bir tahrike kapılmış cezaevi hükümlüsünün durumuna benzetebiliriz.

Bir madde parçasının özkütleye (yanı sıra renk ve dokuya) sahip olması, kuantum fiziği sayesindedir. Klasik açıdan, tüm elektronlar dışarıya enerji yayarak, tüm madde pıhtılaşmış küçük kümeler halini alana dek ve tüm enerji dalgalar halinde elektromanyetik ışınım olarak evrene yayınlanana dek, protonlar ve diğer çekirdeklerin çevresinde dönerler. Dalgalara kuantum yasaları hükmettiği için, elektronlar "büyük" (nanometrenin kesirleri kadar büyük) uzaklıklara yayılabilecekleri hareket durumlarına yerleşirler. Soru 67'de maddenin dalga doğasının atomların boyutlarını nasıl belirlediğini ele almıştık.

Klasik fizikten kuantum fiziğine geçiş, esasen nanometre diyarında gerçekleşir. Kuantum etkileri büyük moleküllerde ve atomların diğer kümelenmelerinde apaçık, tekil atomlarda belirgin biçimde, dolayısıyla modern kuantum fiziğinin odaklandığı *atom-altı* fiziğin derin âlemlerinde de zorunlu biçimde görülmektedir. Fizikçiler en küçük alanlarda neler olup bittiğini öğrenmek isterler. Maddenin dalga doğası bunu zorlu bir iş haline getirir. Dalgalarda geçerli olan genel bir kuraldır; dalga



Resim 54: Uzun dalga boyuna sahip su dalgaları direkten çok az etkilenir. Kısa dalga boyundaki ışık ise büyük oranda etkilenir ve bu direği açıkça görebilmenizi sağlar.

boyunun kendisinden çok daha küçük olan bir boyutu "göremezsiniz". Optik mikroskopiyi sınırlayan ve elektron mikroskoplarının optik mikroskoplara göre daha ince detayları ortaya çıkarmasını sağlayan budur; çünkü bu aletlerdeki elektronların dalga boyları, görünür ışığın dalga boylarından çok daha azdır. Bu etkiyi sudan dışarı çıkan bir direği düşünerek kavrayabilirsiniz (Şekil 54). Su dalgaları yanından geçerken çok az etkilenirler ve direk hakkında hiçbir detayı ortaya çıkarmazlar, çünkü su dalgalarının dalga boyu direğin çapından daha büyüktür. Öte yandan direğin ayrıntılarını sadece ona bakarak, diğer bir deyişle dalga boyu direğin çapından çok daha az olan ışığı kullanma yoluyla görebilirsiniz.

1920'lerde başlayıp (şu anki) doruk noktasına 2010'daki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı ile ulaşan süreçte, hızlandırıcılar giderek daha büyük, daha enerjik ve daha pahalı hale geldiler. (Serbest ve esprili bir sohbet esnasında Enrico Fermi, 21. yüzyılda tüm Dünya çevresini dolaşan bir parçacık hızlandırıcısının yapılacağını ve yapımında dünyanın finansal kaynaklarının büyük bölümünün kullanılacağını tahmin ettiğini söylemişti.) Bu trendin bir nedeni de hızlandırılan parçacıkların daha küçük dalga boylarına erişmek ve bu yolla uzayın daha küçük alanlarını "görebilmek" uğraşıdır. Örneğin Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'ndaki 7 TeV'lik bir proton, yaklaşık olarak 2×10^{-19} m'lik bir dalga boyuna sahiptir ve bu bir atom çekirdeği boyutundan çok daha küçük, hatta protonun kendisinden yaklaşık beş bin kez daha küçüktür.

Dolayısıyla, maddenin dalga doğası giderek küçülen mesafelere ulaşmak için, artan oranda enerjiyi gerekli kılar. Parça-

Werner Heisenberg (1901–1976), burada belirsizlik ilkesini formüle ettiği 1927 yılında görülüyor. Bundan beş yıl sonra, 1932 yılında henüz keşfedilmiş olan nötron ve protonun tek bir parçacığın, nükleonun iki "durumu" oldukları fikrini ileri sürdü. Heisenberg II. Dünya Savaşı'nda Alman atom bombası projesinin liderliğini üstlendi. 1941 yılında işgal edilmiş Danimarka'da Bohr'u ziyareti, Michael Frayn'ın popüler tiyatro oyunu *Copenhagen*'ın temel dramatik hikâyesini oluşturur. 1950'lerin ortalarında Heisenberg'in Göttingen'deki enstitüsünde çalıştığım esnada, Heisenberg devlet yetkilileri ve gazeteciler tarafından görüşlerine sıkça başvurulan bir ulusal kahramandı.

cıklar hareketsiz kalmaktan hoşlanmazlar. Bunun sonucu, fiziğin en büyük aletlerinin paradoksal olarak doğanın en küçük kısımlarını araştırmak için kullanılmasıdır. Elbette mesele, ne kadar yüksek enerji o kadar kısa dalga boyu basitliğinde değildir. Yeni, ağır parçacıklar çeşitliliğinin kütlesini oluşturmak için de enerjiye ihtiyaç duyulur. Yüksek enerji fiziğinin temelinde ise iki basit denklem yatmaktadır: De Broglie'nin $\lambda = h / p$ 'si ve Einstein'ın $E=mc^2$'si.

74. Belirsizlik İlkesi nedir?

İlkeyi 1927 yılında öne sürdüğünde henüz yirmi altı yaşında olan Werner Heisenberg'in önerdiği tanım şu: "Belli bir anda konum ne kadar kesin biçimde belirlenmişse, momentum o kadar az kesinlikte bilinebilir; tersi de geçerlidir." İlke sadece konum ve momentuma değil, zaman ve enerji gibi başka nicelik çiftlerine de uygulanabilir. Esas itibariyle, bir şeyi ne kadar kesin bilirseniz, bir başka şeyi o kadar az kesinlikte bilebileceğinizi söylemektedir. Hatta fikri sınırlarına doğru taşırsak;

eğer bir niceliği tam olarak, eksiksiz tamlıkta biliyorsanız, hakkında hiçbir şey bilmeyeceğiniz başka bir nicelik vardır, anlamına gelmektedir.

Klasik fizikte bir karşılığı yok gibi göründüğü için, belirsizlik ilkesinin kuantum fiziğinin temelinde yer aldığı sıkça söylenir. Klasik bakışla, bir parçacığın aynı anda hem konumunu hem de momentumunu bilememeniz için bir neden yoktur, her iki ölçümün tam olarak elde edilmesi sadece teknik yeterliliklerle sınırlanmıştır. Belirsizlik ilkesi bize, kaçınılmaz belirsizliğin saptanması için bir ölçü sağlar ve bu ölçü kuantum fiziğinin temel sabiti olan Planck sabitinden başkası değildir. (Soru 10'daki tartışmamızı hatırlayın: Planck sabiti varsayım gereği sıfır olmuş olsaydı, kuantum fiziği klasik fiziğe yerini devrederdi. Yine varsayım gereği, Planck sabiti daha büyük olsaydı, kuantum etkileri daha belirgin olurdu. Planck sabiti kuantum dünyasının ölçeğini belirler.) Belirsizlik ilkesi, matematiksel olarak şu şekilde yazılabilir:

$$\Delta x \, \Delta p = \hbar$$

veya

$$\Delta t \, \Delta E = \hbar$$

Bu denklemlerde Δ'lar "...in belirsizliği" anlamına gelir; değişkenler de konum x, momentum p, zaman t ve enerji E'dir. Burada 2π'ye bölünmüş halde verilen, sağdaki Planck sabiti, (ölçüm sürecinin kendisinden kaynaklanan belirsizlikler bir kenara bırakılırsa) kaçınılmaz temel belirsizliklerin büyüklüğünü kontrol eder. Denklemlerin yazılışı Heisenberg'in yukarıda belirttiğimiz tanımının açıklanmasına yardımcıdır; çünkü iki niceliğin çarpımı sabitse, birinin daha küçük olması diğerinin daha büyük olmasını gerektirir.

Belirsizlik ilkesinin zaman-enerji biçimi aslında fizikçiler için çok faydalı bir araçtır. Bazı parçacıklar o kadar kısa bir zaman yaşarlar ki, yarı ömürleri doğrudan ölçülemez. Kısa bir yaşam süresi, parçacığın bu dünyada var olduğu zamanda çok küçük bir belirsizliğe, küçük bir Δt anlamına gelir. O zaman bu küçük Δt, parçacığın enerjisinde büyük (en azından kuantum

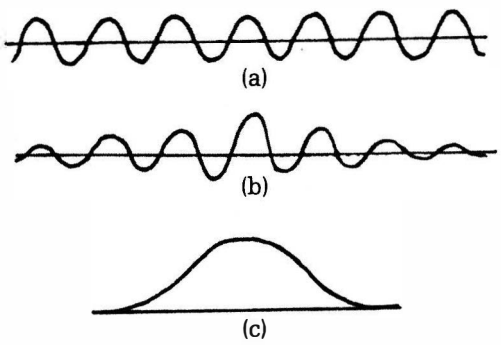
standartlarına göre büyük) bir belirsizlik demektir. Ve parçacığın enerjisi, hareketsiz bir parçacıkta, kütlesindedir. Dolayısıyla yaşam süresi ne kadar kısaysa, parçacığın kütlesindeki belirsizlik o kadar büyüktür. Parçacığın kütlesinin her bir tekil ölçümü, belli bir değere sebep olur. Tekrarlanan ölçümler farklı değerlere sebep olurlar ve değer silsilesi kütlede bir belirsizliği açığa çıkarır. Soru 42'ye cevaben belirttiğimiz gibi, bu kütle belirsizliği Z^0 parçacığının yaşam ömrünün hesaplanmasında ve ardından da teorik beklentilerle karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

75. Belirsizlik ilkesi, maddenin dalga doğası ile nasıl ilişkilenir?

Bazen belirsizlik ilkesinin doğanın içindeki en gizli sırları korumasının bir yolu olduğu söylenir ve (ne yazık ki) bu ilkeyi bilim dışına uygulamaya aday olanların sayısı da pek az olmaz. Her ne kadar temel bir özellik olsa da belirsizlik ilkesi, aslında maddenin dalga doğasının bir sonucu olarak da görülebilir; böylece maruz kaldığı başka-dünyadan gelmiş muamelesi kesinlikle azalarak bu ilke daha az gizemli hal alır.

Dalgalar sadece kuantum alanına özgü değildir. Gündelik yaşantımızın büyük ölçekli dünyasında olağan bir yer tutarlar. Bu klasik dünyada da belirsizlik ilkesinin kimi biçimlerine yer olduğu anlamına gelir.

Dalgaların içyüzünün anlaşılmasında Fransız matematikçi Jean Baptiste Joseph Fourier'ye çok şey borçluyuz. Bir yerden bir diğerine çeşitlilik gösteren bir niceliğin (örneğin bir odadaki sıcaklık ya da kapalı bir yerdeki gazın özkütlesi veya Manhattan'ın değişik sokaklarında yer alan binaların ortalama yüksekliği gibi) dalgaların üst üste binmesiyle açıklanabileceğini keşfeden odur. Bu düşünce Şekil 55'de gösterilmiştir. Şekildeki (a) kısmı, *sinüs dalgası* denilen "saf" bir dalgayı göstermektedir. Kesin bir dalga boyuna ve kesin bir genliğe sahiptir; her iki yön doğrultusunda sonsuza uzanmaktadır. (b) kısmındaysa görünüş itibarıyla saf dalgaya benzeyen, ancak alan yönüyle sınırlanmış ve genliği farklılık gösteren bir dalga



Resim 55: (a) Tek bir dalga boyuna sahip "saf" bir dalga. (b) Alan yönüyle sınırlı dalga; farklı saf dalgaların bir karışımıdır. (c) Daha da sınırlanmış bir dalga; karışmış dalga boyları yelpazesi daha da geniştir.

resmedilmiştir. Yaklaşık beş salınım evresine sahiptir, ardından her iki yönde de sönümlenmektedir. Fourier'nin analizine göre bu kesik dalga, eşit genliğe sahip olmamasına karşın, sonsuz sayıda saf dalganın birbirine eklenmesine eşdeğerdir. Temel bileşeni (a) kısmında gösterilen saf dalgadır. Farklı dalga boylarına sahip ikinci dereceden başka dalga bileşenleri de sözkonusudur. (b) kısmındaki dalgayı oluşturmak için üst üste binmiş veya birbirine karışmış olan baskın dalgaların dalga boylarının, esas dalga boyundan yaklaşık yüzde 20 zarfında farklılık gösterdiği ortaya çıkmıştır.

Şimdiden klasik belirsizlik ilkesinin ipucunu yakalamak mümkün gözüküyor. (a) kısmındaki dalganın dalga boyu açısından hiçbir belirsizliği yoktur, ancak konumu açısından tam (sonsuz) bir belirsizlik sözkonusudur, çünkü her iki yöne doğru sınırsız biçimde uzanmaktadır. (b) kısmındaki dalganın tek bir kesin dalga boyu yoktur. Çoğu esas dalga boyunun yüzde 20'lik aralığı içerisinde yer alan, farklı dalga boylarındaki dalgaların üst üste binmesidir. Dolayısıyla esas dalga boyunun yaklaşık yüzde 20'si kadar genişleyen bir dalga boyu belirsizliğine, dolayısıyla işgal ettiği alan aralığı itibariyle bir konum belirsizliğine de sahip olduğunu söyleyebiliriz.

Tahmin edebileceğiniz üzere; eğer bir dalga konumunda daha az belirsizlik olması için daha fazla alansal kısıtlamaya tabi tutulursa, farklı dalga boylarından oluşan daha geniş bir yelpazenin birbirine karıştırılması (üst üste bindirilmesi) gerekir. Konumda daha az belirsizlik, dalga boyunda daha büyük

Jean Baptiste Joseph Fourier (1768–1830). 1789 yılında Fourier bir arkadaşına "Dün benim 21. doğum günümdü; bu yaştayken Newton ve Pascal kendilerini ölümsüzlüğe taşıyacak başarılara çoktan imza atmışlardı" diye yazar. Fourier'nin biraz daha sabretmesi gerekiyordu. "Ölümsüzlüğe taşıyacak bir başarı" sağlayan çalışmasını kırk yaşına doğru gerçekleştirdi. Bugün Fourier serileri ve Fourier dönüşümleri hemen tüm fizikçiler ve mühendisler tarafından yaygın olarak kullanılır. Fourier Napolyon ve Fransız Devrimi'nin ateşli bir destekleyicisiydi ve Mısır işgalinde Napolyon'a eşlik etti. Mısır'da kaldığı üç yıl süresince Kahire Enstitüsü'nün kuruluşuna yardımcı oldu ve daha sonra Mısır üzerine kaleme alacağı kapsamlı bir çalışma için bilimsel ve edebi bilgi topladı.

belirsizliği beraberinde getirir. Şekil 55'in (c) kısmındaki dalga, tek bir "tepe" oluşturuncaya dek bastırılmıştır. Bu lokalizasyonu (konumdaki belirsizliğin bu küçüklüğünü) elde etmek için, dalga boylarının çok geniş bir yelpazesi üst üste bindirilmelidir, bu da dalga boyunda büyük bir belirsizlik anlamına gelir.

Şekil 55'teki dalgalar klasik dalgalar olabilir, ancak bir an için bunların hareketli bir parçacığın de Broglie dalgaları olduğunu düşünelim. Birinci şekil, momentumu değişmeyen (dalga boyu değişmeyen) ve tüm uzaya yayılan bir parçacığı temsil eder. Parçacığın momentum belirsizliği sıfırdır, konum belirsizliği sonsuzdur. Ne hızla hareket ettiğini tam olarak bilir, nerede olduğunu ise hiç bilmeyiz. Bu Heisenberg belirsizlik ilkesinin sınırlı bir örneğidir. İkinci dalga, kısmi olarak yerelleşmiş (konumun belli ölçüde belirsizliği) ve momentumunda da belli ölçüde belirsizlik olan bir parçacığı gösterir. Üçüncü dalga konum belirsizliğini küçük bir değere itmiştir, ancak bu momentumun neredeyse tamamen belirsizliği pahasına gerçekleşmiştir.

Klasik dünyada belirsizlik için iyi bir örnek AM (genliği değiştirilmiş) radyo bandıdır. 720 kilohertz (kHz), 730, 740 vs de yayın yapan istasyonlar vardır, ancak bunların hiçbiri 721 veya 739 veya başka bir ara frekansta yayın yapmazlar. Bu harika frekansların boşa harcanması mıdır? Hayır, çünkü hava yoluyla mesajı elde etmek için genliği değiştirme eylemi, frekansların (veya dalga boylarının) karıştırılmasını gerektirir. Aslında 720 kHz istasyonun anteninden dışarıya giden, kabaca 715 ile 725 kHz arasındaki frekansların üst üste binmesidir. Dalga mekânda sınırlandırılmıyor gibi görünmesine karşın, bu kadar çok frekansın (ve dalga boyunun) karıştırılmasının neden gerekli olduğunu merak edebilirsiniz. Mekânda yayıldığına göre bu sınırlandırma olmadığının bir göstergesi değil mi, diye sorabilirsiniz. Ancak aslında sayısız parçaya bölünerek sınırlandırılmıştır. Yayımlanan her milisaniyede bir (saniyenin binde biri) tekrar değişmekte ve bu küçük milisaniye parçaları (hatta milisaniyenin altındaki parçalar) korunmak zorundadır. Radyo yayını dalgası, (her biri üst üste binmiş frekans şeridini gerektiren) sınırlandırılmış parçaların oluşturduğu uzun bir dizidir.

Otomatik bir telefonun on haneli bir numarayı iletmesinin en az birkaç saniye gerektirdiğini hiç fark ettiniz mi? Doğal olarak "Bu yetersiz değil mi? Neden bilgi saniyenin onda biri veya daha az sürede iletilmiyor, bu artık elektronik devreler için sorun olmamalı" diye düşünebilirsiniz. Cevabı belirsizlik ilkesidir (klasik versiyonu). Otomatik basılan her "tuş" için iki ton iletilir, bunlar 700 Hz ile yaklaşık iki katı arasında yer alan baskın frekanslarla iletilirler ve "bitişik" tonların frekansları birbirlerinden yaklaşık yüzde on farklılık göstererek ayrılırlar. Her bir vuruşun süresi ne kadar kısaysa, baskın frekansla karıştırılan frekans yelpazesi o kadar büyüktür. Vuruş uzunluğu çok kısa olsaydı, farklı tonlar net biçimde birbirinden ayrılamaz ve alıcı devre "mesajı" anlayamazdı. Sizin parmaklarınız tuşlar üzerinde dans ederken tonları karmakarışık hale getirmeniz yönünde bir tehlike yoktur, ancak otomatik çeviriciler için bu tehlike sözkonusudur. Yenisi başlamadan önce her bir tonun yaklaşık otuz salınımına izin vermeye yetecek ölçüde ya-

vaş olmaları gerekir. Bu, frekansların yüzde üç veya daha az "bulaşmasını" güvence altına alır, böylelikle baskın frekansların alıcı tarafından tanınması devam etmiş olur. Otomatik aramanın maksimum oranı saniyede yaklaşık on dört "tuş" ile standardize edilmiştir.

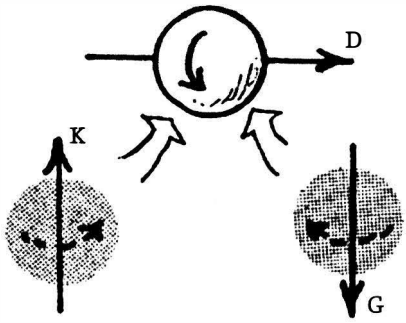
Belirsizliğin hem klasik dünyada hem de kuantum dünyasında var olduğunu ve her iki dünyada da mekânsal sınırlanmanın dalga boylarının karışmasını gerekli kıldığını ifade ettim. (Yine, her iki dünyada da, zamanda sınırlanma frekansların karışmasını gerektirir.) Temel bir farkın varlığı ise devam eder: kuantum belirsizlik ilkesinde Planck sabitinin kendisini göstermesi. Sadece kuantum alanında dalga boyu momentumla, frekans da enerji ile ilişkilidir. Bu yüzden kuantum belirsizliğinin sahip olduğu kütle, enerji ve momentumun maddi özellikleri, klasik belirsizlikte kendisine yer bulmaz.

76. Üst üste binme nedir?

Daha öncesinde *üst üste binme* ve *karışma* kavramlarını, iki veya daha çok genliğin birbirine eklenmesi anlamında, birbirinin yerine geçecek şekilde kullandım. Kendinizi bir limanda her biri kendi dalgasını yaratan sürat motorları yanınızdan geçerken, suyun üstünde bir şambrelin içinde sallanır vaziyette hayal edin. Hissettiğiniz, tüm dalgaların üst üste binmesidir. Kuantum fiziğinde üst üste binme daha geniş bir anlama sahiptir. Sadece dalga genlikleri değil, tüm hareket durumları da üst üste binebilir.[74] Bir parçacık (veya bir sistem), aynı anda iki veya daha fazla hareket durumunda olabilir. Üstüne üstlük, tam kesinlikte bir hareket durumu, başka hareket durumlarının üst üste binmesi olabilir.[75]

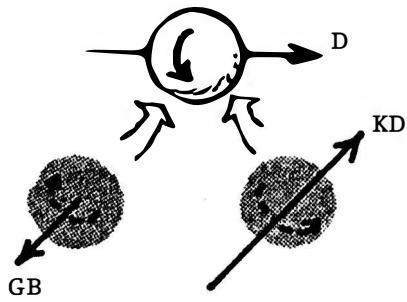
74 Kuantum mekanik matematiğinde bir hareket durumu bir genlik aracılığıyla tanımlanır, dolayısıyla üst üste binmiş durumlar aslında genliklerin toplanması sürecidir.

75 Vektörlere yabancı değilseniz, bu fikirler o kadar da gizemli gelmez. İki veya daha fazla vektör toplanarak (üst üste bindirilerek) tek bir vektör oluşturulabilir. Ve tek bir vektör de başka vektörlerin üst üste binmesine "ayrıştırılabilir".



Şekil 56: Elektronun doğu yönlü spini, kuzey ve güney yönlü spinlerinin eşit karışımıdır.

Bir örnek olarak, spini doğuya yönlenmiş bir elektronu düşünün. Bu kesin bir durumdur. Spinin doğu yönünde olup olmadığını tespit etmek için ölçüm yaparsanız, öyle olduğunu bulursunuz. Batı yönünde olup olmadığını görmek için ölçüm yaparsanız, öyle olmadığını bulursunuz. Ancak diyelim ki aykırı bir kişiliğe sahipsiniz ve elektronun spininin kuzey yönünde olup olmadığını tespit için ölçüm yapıyorsunuz. Kuzeyde olduğunu tespit etmek için yüzde 50 şansa sahipsiniz. Çünkü elektron kesin doğuyu gösteren durumunda aynı zamanda, kuzeyi gösteren ve güneyi gösteren durumlarının üst üste binmiş halindedir (Şekil 56). Doğuyu gösteren genliği 1,00'dır (bu onu kesin yapar) ve batıyı gösteren genliği sıfırdır. Aynı zamanda,



Şekil 57: Elektronun doğu yönlü spini, kuzeydoğu ve güneybatı yönlü spinlerin eşit olmayan karışımıdır.

kuzeyi gösteren ve güneyi gösteren genliklerinin her ikisi de 0,707'dir. Bu sayının nedeni genliğin karesinin olasılığı vermesidir ve 0,707'nin karesi 0,50 veya yüzde 50 eder.

Burada üst üste binme ile olasılık arasındaki önemli bağlantıya dikkat edelim. Durumlar üst üste bindiğinde her biri belli bir genliğe sahiptir ve herhangi bir genliğin karesi de, ölçümün sistemin o durumda olmasını ortaya çıkartmasının olasılığını verir.

Verili bir durum, başka durumların üst üste binmesi olarak çok çeşitli biçimlerde yazılabilir. Örneğin Şekil 57'de gösterildiği gibi, kesin doğu yönlü spini ile bir elektron, kuzeydoğu yönünde 0,924 genliği olan bir durum ile güneybatı yönünde 0,383 genliği olan bir durumun üst üste binmesi olabilir (olasılıklar sırasıyla yüzde 85 ve yüzde 15 olur).

Üstü üste binme ile olasılık arasındaki bu ilişki, dalga fonksiyonunu farklı bir yönden yorumlamanın olanağını sağlar. Örneğin Şekil 52'de göstermiş olduğumuz, hidrojen atomunda taban durumundaki elektronu ele alalım. Dalga fonksiyonunun karesinin, elektronu belirli bir yerde (aslında bu yerin çevresindeki küçük bir alan içerisinde) bulma olasılığını verdiğini açıklamıştık. Ancak küçük bir alana hapsedilmiş elektronun kendisi *sınırlandırılmış durum* diyebileceğimiz bir hareket durumundadır. Dolayısıyla Şekil 52'deki dalga fonksiyonunca temsil edildiği üzere, hidrojen atomunun taban durumu, çok sayıda sınırlandırılmış durumun üst üste binmesidir. Bu sınırlandırılmış durumların her birisinin genliği, dalga fonksiyonunun tam o yerdeki büyüklüğüne eşittir. Bu sınırlandırılmış durumların tümü doğru biçimde birleşirse (üst üste binerse), sonuç tek bir hareket durumu, hidrojen atomunun taban durumu olur. Ardından eğer hidrojen atomunun taban durumundaki elektronun gerçekten belirli bir sınırlandırılmış durumda olup olmadığını öğrenmek için bir ölçüm yaparsanız, belirli bir olasılıkla öyle olduğunu bulursunuz ve bu olasılık da o yerdeki taban durumu dalga fonksiyonunun karesidir. Burada ilke, spini doğuyu gösteren bir elektronun spininin aslında kuzeyi gösterip göstermediğine bakmakla aynıdır.

77. Dalgalar gerekli mi?

Parçacıkların dalga boyları olur. Parçacıklar kırınıma ve girişime uğrarlar. Parçacıkların dalga fonksiyonları vardır. 1924 yılında de Broglie'nin ünlü denklemini ortaya atmasından bu yana, kuantum fiziğinin tüm tarihi maddenin dalga doğası üzerine bina edilmiştir. Haklı olarak dalgaların kuantum alanının temel bir konusu olduğunu söyleyebiliriz. Haklı olarak dalgaların fiziksel dünyanın temel bir olgusu olduğunu teslim ederiz. Yine de, garip ama gerçek, "dalgalar gerekli mi?" sorusuna yanıtımız, "aslında değil" olmalıdır.

Dalga-parçacık ikiliğine sıklıkla bir masal kahramanı muamelesi yapılır; bir parçacık mucizevî biçimde şeklini değiştirip dalga oluyor, ardından tekrar şekil değiştiriyor veya aynı anda her iki şey birden olabiliyor. Peki, gerçekten ne oluyor? Bir parçacık mı? Dalga mı? Yoksa ikisi birden mi? Kuantum fiziğinin bize söylediği, aslında bir parçacığın sadece ortaya çıktığı ve ortadan kalktığı (doğduğu ve öldüğü, yayınlandığı ve soğurulduğu) anlarda bir parçacık olarak davrandığı, bu ikisi arasındaki dönem boyunca ise dalga olarak davrandığıdır. Ölçümler parçacıkları su yüzüne çıkarıyor. Bir ölçümün sonuçlarının ne olabileceği üzerine tahminlerdeyse dalgalar kullanılıyor. Bu yüzden dalga bir çeşit olasılığı veya ihtimali temsil ediyor. Parçacıksa gerçeği temsil ediyor.

1940'ların başında, dalga-parçacık ikiliğinin fiziğin bir parçası olarak kutsanmasının üzerinden bir düzine yıldan fazla zaman geçtikten sonra, atik bir genç, Richard Feynman Princeton'da profesörü John Wheeler'ın yanına geldi ve şunları söyledi: "Dalgalara ne gerek var? Her şey parçacık." Feynman'ın keşfettiği şey; bir parçacığın doğum anından ölüm anına dek olasılık dalgası olarak yayılmadığını, bunun yerine bir noktadan diğerine tüm olası yolları *eşanlı* olarak takip ettiğini varsayma yoluyla, standart kuantum teorisinin sonuçlarının kopya edilebileceğiydi. Onun yaptığı, üst üste düşme fikrini dalgalar ve durumlarla sınırlı tutmayıp yolları kapsayacak şekilde genişletmekti. Her bir yola bir genlik tahsis etmenin yolunu buldu; bu toplanmış genlikler (veya üst üste binmiş genlikler) - aynı şeyi hesaplamak için dalganın kullanılmasın-

dan farksız biçimde - parçacığın sözkonusu özgül kaderi için toplam genliği bize veriyordu.[76]

Feynman bu yeni yaklaşımına *yol integrali yöntemi* adını verdi. Yeni kavramlar ortaya atmayı seven Wheeler bunu *süreçleri toplama yöntemi* olarak tekrar isimlendirdi. Otobiyografisinde[77] anlattığı üzere Wheeler ileri sürülen bu fikirden öylesine etkilenir ki, paylaşmak için hemen kendisine yakın oturan Einstein'ı ziyarete gider ve bu vesileyle Einstein'ın kuantum fiziği fikirlerine karşı beslediği antipatiyi sarsabileceğini umar. (Kuantumun öncülerinden olmasına karşın Einstein kuantum fiziğinin olasılıkçı yorumlarından nefret etmiştir.) Einstein'ın üst kattaki çalışma odasına geçerler, Wheeler Feynman'ın fikirlerini açıklamak için yirmi dakikasını harcar ve (hatırladığı kadarıyla) şöyle der: "Profesör Einstein, kuantum mekaniğine bu yeni yaklaşım sizce de kuramı kabullenmeyi tamamen akla uygun kılmıyor mu?" Wheeler'ın aktarımına göre Einstein yerinden kıpırdamaksızın kısa bir yanıt verir: "Hala Tanrı'nın zar attığına inanamıyorum." (Bu kitaptaki son soru olan 101. Soruda, gelecekteki gelişmelerin Einstein'ın kuantum fiziğine karşı duyduğu rahatsızlığı doğrulayıp doğrulayamayacağı üzerine tartışacağız.)

Feynman'ın çarpıcı sezgisine karşın, dalgaları kuantum fiziğinden sürgün etmenin lüzumu yok. Doğru, dalgalar gerekli değil; ancak uygun ve elverişli oldukları kesin. Kuantum dünyasında olup bitenler dalga davranışına öylesine yakından benziyor ki, bu dünyayı açıklamak için dalgaları kullanabiliriz.

76 Feynman'ın yönteminin popüler bir açıklaması 7. sorunun dipnotunda referans verdiğimiz büyüleyici kitabı *QED: The Strange Theory of Light and Matter*'da bulunabilir.

77 *Geons, Black Holes, and Quantum Foam: A Life in Physics* (New York: W.W.Norton, 1998), s.168

XIII. Bölüm

Kuantum Fiziği ve Teknoloji

78. Parçacıklar ışık hızına yakın hızlara nasıl çıkartılıyorlar?

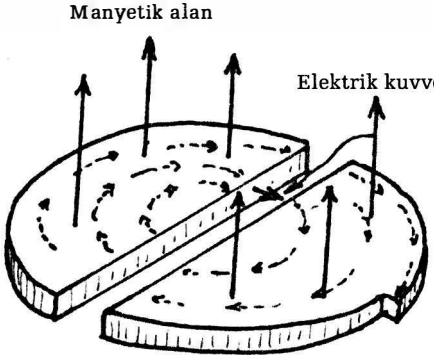
Bu soruya kısa yanıt "Elektriksel yolla". Yüklü parçacıkların elektrik kuvvetler tarafından daha hızlı gitmesi sağlanabilir.[78] Manyetik kuvvetler, parçacıkların hızını değiştirmeksizin yönünü değiştirebilir. Katot ışını tüpleri, bu unsurlardan faydalanır. Bu tip bir tüpün içerisinde elektronlar elektrik kuvvetler aracılığıyla yüksek hızlara çıkarılırlar, sonra da manyetik kuvvetler aracılığıyla ekrandaki noktalara yönlendirilirler. Parçacık hızlandırıcıları da bu iki çeşit kuvvetten faydalanmaktadırlar. Dairesel makine denen (*tam olarak* dairesel değildirler) bir makine içerisinde, parçacıklar (genellikle protonlar) manyetik kuvvetlerce bir halka çevresine yönlendi-

78 Elektrik kuvvetlerle yavaşlatılabilirler de, ancak yüksek enerji fizikçileri bunu yapmaya pek fazla ilgi duymazlar.

rilirler ve elektrik kuvvet darbeleriyle daha yüksek enerjilere çıkartılırlar. Doğrusal bir hızlandırıcıda elektrik kuvvet, parçacıkları (genellikle elektronları) düz bir kanala doğru sürer ve parçacıkların gerili bir ışın şeklinde toplaşmasını sağlamak için de manyetik kuvvetler kullanılır.

Yüksüz bir parçacık, örneğin nötron, (küçük olanları iç manyetizmasıyla ilişkili olarak hariç olmak üzere) elektrik veya manyetik kuvvetleri hissetmez; dolayısıyla yüklü parçacıkların hızlandırıldığı gibi hızlandırılamaz. En fazla birkaç milyon elektron voltluk mütevazı bir enerjiye sahip nötronlar, nükleer tepkimelerin sonucu olarak güvence altına alınabilirler ve "mermi" (fırlatılan cisim) olarak kullanılabilirler. Ancak genellikle fizikçiler deneylerde çok daha yavaş nötronları kullanırlar. Bazen nötronları ısı dengesine kavuşturma yoluyla yavaşlatma zahmetine bile girdikleri olur; bu işlem nötronların 1 eV enerjinin sadece bir bölüntüsüne (ve güzel geniş dalga boylarına) sahip oluncaya dek soğuk malzeme atomlarına çarptırılıp geri teptirilmeleriyle gerçekleştirilir.

Nükleer fiziğin yirminci yüzyıl başındaki doğuşundan bu yana, fizikçiler maddenin daha derinlemesine araştırılabilmesi için parçacıkların daha yüksek enerjilere sahip olmasını arzu etmişlerdir. Başlarda ilk fırlatılan cisimler doğa tarafından sağlanıyordu: Önce radyoaktif bozunumda yayınlanan alfa parçacıkları, daha sonra da kozmik ışınlar. Alfa parçacıkları birkaç milyon elektron voltluk enerjiye sahiptiler. Kozmik ışınların enerjileri trilyon, katrilyon, kentilyon elektron volt-



Resim 58: Siklotronun mantığı: Yüklü parçacıklar "d tipi elektrotlar" içerisinde dönerler, yolları manyetiksel bükülmeye uğrar, hızları da elektriksel yolla artar.

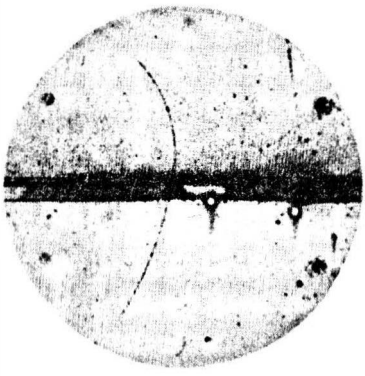
lara uzanabiliyordu, bunlardan bazıları fizikçilerin hızlandırıcılarda üretebildiklerinin en iyisinden daha enerjikti, ancak seyrek bulunuyorlardı, zaman ve yön açısından tesadüfî biçimde elde edilebiliyorlardı ve çok sayıda farklı enerjinin serpintisi olma özelliği taşıyorlardı. Dolayısıyla tanımlı enerji ışınları olarak kontrol edilmeleri hesapsız harcamaları zorunlu kılıyordu.

1920'li yıllardaki ilk hızlandırıcılar, protonları düz bir yolda ilerlerken birkaç yüz bin elektron voltluk enerjilere çıkarmak için gerekli olan elektrik kuvvetlere ulaşmak üzere yüksek voltaj kullanıyorlardı. 1932'de California Üniversitesi'nden Ernest Lawrence, sonradan siklotron adı verilecek olan, ilk dairesel makineyi icat etti. Büyük bir "ilaç kutusunu", yüksekliğinden daha geniş bir silindiri gözünüzün önüne getirin, bunu ortadan düz bir şekilde keserek iki adet içi boş "d tipi elektrot" şekli ortaya çıkarın (Şekil 58). Manyetik bir alan, protonların (veya döteronlar ya da alfa parçacıkları) d tipi elektrotta yarım birer daire oluşturmasına neden olur. Ardından, parçacık iki d tipi elektrot arasındaki boşluğu geçerken, minik bir elektrik itki verilir. Diğer d tipi elektrota daha yüksek bir hızla giriş yapar ve daha geniş çaplı bir yarım daire hareketini de burada gerçekleştirir. Boşluğu tekrar aşarak daha yüksek bir hıza itelenir ve ardından daha da geniş bir yarım daire gerçekleştirir. Bu, d tipi elektrotların dış çemberine neredeyse değene dek dışa doğru spiralleşerek sürer. İşte o zaman "çıkarılmış" hale gelir (yine manyetik kuvvetler) ve artık bir mermi olarak kullanılabilir.

Siklotronun özelliği, (ışık hızından çok daha az olması şartıyla) hız ne olursa olsun her bir yarım devir için gereken zamanın aynı olmasıdır; böylelikle saniyede milyonlarca kez gerçekleşmesi gereken elektrik darbeler, eşit zaman aralıklarında (bir diğer deyişle sabit bir frekansta) uygulanabilir. Bu aracın temel sadeleştirici özelliğidir. Hız daha büyük olduğunda ve görelilik etkileri önem kazandığında, her bir yarım devirin bir öncekinden biraz daha uzun sürdüğü ortaya çıkar; dolayısıyla uygulanan elektrik darbe frekansı, parçacıklar dışa doğru spiralleştikçe küçülmek zorundadır. Mütevazı enerjide, siklotron

istikrarlı bir ışın yayabilmektedir. Parçacıklar dışa doğru spiralleştikçe frekans değişmek zorunda kaldığından, ışın darbeler biçimde yayınlanır. Siklotronlar yüzlerce milyon elektron voltluk enerjilere ulaşmışlardır, bu 1920'lerin doğrusal hızlandırıcılarının ulaşabildiğinin kabaca bin katı bir büyüklüktür.

Modern dairesel hızlandırıcılara *senkrotron* adı verilmektedir. Bir senkrotron, merkezi kaldırılmış bir siklotrona benzemektedir. Dışa doğru spiralleşmek yerine, parçacıklar sabit yarıçapa sahiptirler, mıknatısların yol gösterdiği bir çember içinde hareket ederler ve periyodik elektrik kuvvet darbeleriyle hızlandırılırlar. Parçacık giderek daha fazla enerji kazandıkça, hızı giderek daha fazla ışık hızına yaklaştıkça, yönünü değiştirmek de giderek daha zor bir hal alır. Dolayısıyla parçacık enerji kazandıkça, manyetik kuvvetin de adım adım arttırılması gerekir. Bu senkronize elektrik-manyetik dans, İsviçre'nin Cenevre kentindeki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda, parçacıkların çapı yaklaşık 5 cm olan bir tüp içerisindeki 27 km'lik dairesel yollarında hareket edebileceği şekilde ayarlanmıştır. Yerin yaklaşık ortalama 100 metre altında, İsviçre-Fransa sınırını saniyede yirmi bin kereden daha fazla geçecek şekilde bir hız kazanırlar. Bugün Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda 7 TeV'lik iki protonun çarpışması, hızlandırıcılar içerisinde yeni bir dünya rekoru olan 14 TeV'lik bir toplam enerjiyi ortaya çıkartmak üzeredir. Bu, sıralamada ikinci sırada yer alan Chica-



SLAC Ulusal Hızlandırıcı Laboratuarının havadan görünüşü. Elektronlar yer üstündeki deney alanında yer alan 2 mil uzunluğundaki bir boru içerisinde hızlandırılmaktadır. Kısa ifadesiyle elektronlar yer üstündeki gömülü çemberler içerisinde "muhafaza edilebilmektedirler".

go yakınlarındaki Fermilab'taki hızlandırıcıdan yedi kat daha fazla ve tipik bir siklotronun enerjisinden de yaklaşık yüz bin kat daha fazla bir miktardır.

Dairesel makineler karşısında doğrusal hızlandırıcılardan kati suretle vazgeçilmemiştir. Tercih edilmelerinin bir sebebi de, elektronların dairesel bir makinede enerji kaybetme (bir diğer deyişle foton yayma) eğiliminde olmalarıdır. Doğrusal hızlandırıcılarda şu anki rekor, elektronları 50 GeV'ye çıkaran Kaliforniya'daki iki mil uzunluğundaki Stanford Doğrusal Hızlandırıcısı'ndadır[79]. Elektronlar temel parçacıklar oldukları için, belli bir "saflığa" (veya bagaj yokluğuna) sahiptirler; bazı parçacık deneylerinde bu onları bitimli boyutları ve kuark bileşenleri olan bileşik protonlara göre daha çekici kılmaktadır.

79. Yüksek enerjili parçacıkların algılanması nasıl gerçekleşir?

İlk parçacık dedektörü, insan gözüyle görülebilen bir çinko sülfür ekrandı. O dönemde Rutherford ve diğer araştırmacılar enerji yüklü parçacıkların (başlangıçta alfa parçacıklarının) bu kimyasalla kaplanmış bir ekrana çarptıklarında, parçacıkların iniş yaptıkları yerde küçük ışık spotları halinde patlayarak püskürdüklerini gözlemlediler. Karanlığa gözü alışmış bir insan bu ışık spotlarını görebilir; sayı ve pozisyonlarını takip ve tespit edebilirdi. Özen gerektiren zor bir işti.

1911 yılında gelecek on yıllar boyunca faydalı olacak başka iki dedektör daha icat edildi. Rutherford'un öğrencisi Hans Geiger, bugün herkesçe kendi adıyla bilinen *Geiger sayacını* geliştirdi. İçerisinde düşük yoğunlukta bir gaz bulunan bir silindirin ekseni boyunca uzanan ince bir telden oluşmaktaydı, tel ile silindir arasına birkaç yüz voltluk bir gerilim uygulanmaktaydı. Silindirin içerisindeki gaz iyi bir yalıtkan olduğu için tel ile silindir arasında bir akım debisi gerçekleşmiyor,

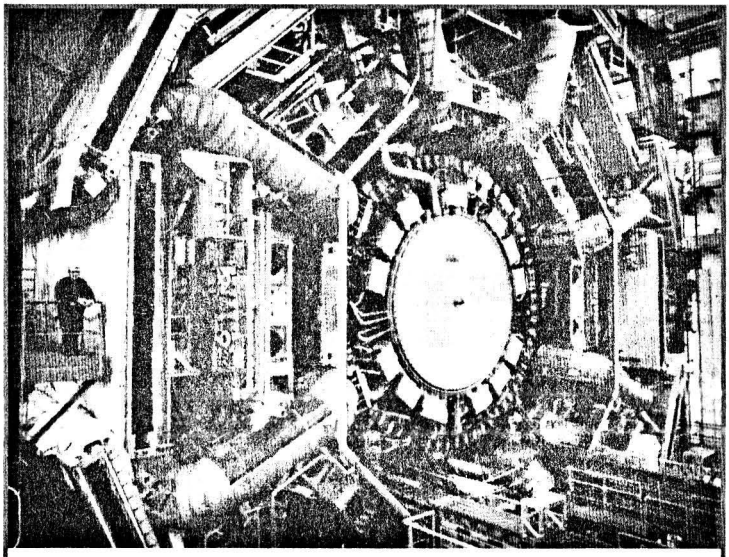
79 1920'lerdeki ilk doğrusal hızlandırıcılar, hızlandırıcının bir ucundan diğerine dek etki eden tek bir elektrik kuvvet kullanırlarken, modern doğrusal hızlandırıcılar ise tüm bir yol boyunca bir dizi elektrik kuvvet darbesi olanağı sunmaktadırlar.

en azından silindir içerisinden bir yüksek enerjili parçacık geçmedikçe gerçekleşmiyordu. Ardından parçacığın hareketiyle bir iyon dizisi gazı daha iyi bir iletken haline getiriyor ve tel ile silindir arasında küçük bir kıvılcım ortaya çıkıyordu. Doğru bir elektrik devresi kurulduğunda, kıvılcım işitilebilir bir uyarı sesini tetikleyebiliyordu.[80] (Yüksek enerjili parçacık - yüklü bir parçacık veya gama ışını fotonu olabilir - gazdaki moleküllerden dışarıya elektron atar, yüksüz atomların bazılarını pozitif yüklü iyonlara ve negatif yüklü elektronlara çevirir. Minik kıvılcım sönümlendikten sonra, elektronlar hızlıca tekrar iyonlara dönmenin yolunu bulurlar ve gaz yeniden yüksüz hale gelir.)

İskoçyalı fizikçi C.T.R.Wilson sis odası adlı diğer dedektörü icat eder. Sis odası tipik bir silindirdir, yüksek olmaktan ziyade geniştir, dairesel taraflarından birinin üzerinde yuvarlak cam bir bölme vardır, buradan araştırmacı içine bakabilir, diğer dairesel tarafında ise hareketli bir diyafram bulunur. Odanın iç kısmını su buharıyla doymuş hava kaplar. Diyafram biraz çıkarıldığında, hava soğur ve buhar bir bulut halini alır. Bu eylemden az önce eğer iyonlaştırıcı bir parçacık odadan geçtiyse, ardında bir iyon dizisi bırakacaktır ve su buharı önce iyonlar üzerinde küçük damlalar biçiminde yoğunlaşacak ve bulut odaya yayılmadan önce, bir saniyenin kısa bir anı için geçerli olmak üzere parçacığın yolunu görünür hale getirecektir. Oda manyetik bir alan üzerine oturtulmuşsa, içinden geçen yüklü parçacıklar kavisli izler bırakacaktır. Carl Anderson'ın 1932'de pozitronu keşfinde sis odasından faydalanılmıştır.

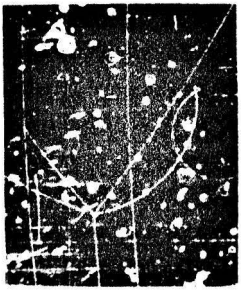
Şimdi 1911'den yüzyıl kadar ileri saralım zamanı. Cenevre'de kurulu Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'ndaki altı büyük dedektör tertibinden biri olan ATLAS'ta, bir kirişe ortalanmış iç içe

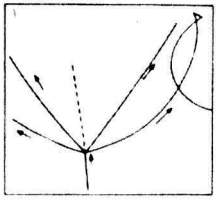
80 Çölde Geiger sayacı taşıyan bir uranyum arayıcısı, radyoaktif minerallerden gama ışınları algılamaya çalışır. Alfa ve beta parçacıkları, toprak ve havanın içerisinden geçerek sayaca ulaşamazlar. Herhangi bir radyoaktif malzemeden uzakta bir yerde oturulduğunda dahi Geiger sayacı ses verir, onu esasen aktive eden müonlar, atmosferin üst tabakasında kozmik ışınlar tarafından yaratıldıkları yerden aşağı doğru çizgileşmektedirler.



Fotoğrafı Carl Anderson tarafından 1932'de çekilen ve 1933'te yayınlanan bu sis odası, pozitronun varlığının tanıtılmasına yardımcı olmuştur. Odanın manyetik alanı içerisindeki izden yola çıkarak Anderson, hafif bir parçacığın odanın içerisinden geçtiği sonucunu çıkarır, bu ya aşağıya doğru hareket eden negatif bir parçacık ya da yukarıya doğru hareket eden pozitif bir parçacıktır. Merkezdeki metal tabağın üst tarafındaki izdeki daha büyük kavislenme, parçacığın orada daha yavaş hareket ettiğini, tabak boyunca yukarıya doğru ilerlerken enerji kaybettiğini gösterir.

geçmiş silindirik dedektörler, kiriş boyunca 150 feet genişlemeyle kirişten radyal olarak 40 feet uzağa dek uzanmaktadırlar. ATLAS'ın içerisinde birbirinden farklı sayısız dedektör ve mıknatıs vardır ve toplam ağırlığı da Eyfel Kulesi'ndeki demir yükü kadardır. Elektronik devreleri saniye başına yaklaşık 300 milyon bit bilgiyi depolayabilmektedir. ATLAS'ın merkezinde bir yöne doğru 7 TeV ile hareket eden protonlar, diğer yönden gelen 7 TeV'lik protonlarla kafa kafaya çarpıştırılmaktadır. Bu çarpışma sonucu 14 TeV'lik bir enerji açığa çıkmaktadır ve bu enerji binlerce değilse de, yüzlerce yeni parçacığın oluşumunu ve onlara çevreleyen dedektör katmanları içerisinden dışarı fırlamak için yeterli hareket enerjisini sağlamaktadır. Yara-





Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'ndaki ATLAS dedektörü kısmi toplanmış haliyle görülüyor. Merkezdeki küçük tüp, protonların girdiği yerdir.

tılan parçacıkların kiriş yönü boyunca uçuşan çok küçük bir kısmı saptanmadan geçer. Diğerleri tüm yönlere doğru yayılır ve dedektör tertiplerinde yansımalarını yaratırlar.

Geiger sayacı ve sis odasını iki paragrafta anlattım. ATLAS'ta olan biteni anlatmak içinse sayfalar ayırmak isterdim. Ancak prensip olarak ATLAS'ın tüm dedektörleri de, Geiger sayacı ve sis odasını çalıştıran yüksek enerjili parçacıklardaki aynı temele dayanmaktadır: Parçacıklar atomları alt üst eder ve elektronları özgürleştirirler. İster minik katı silikon parçalarından, isterse argon gazından geçme yoluyla olsun, yüksek enerjili bir parçacık (nötrino değilse) arkasında elektronik olarak saptanıp kaydedilebilen bir atomik "yıkım" izi bırakır. Rutherford'un zamanında araştırmacı çinko sülfür ekrandaki ışıldamalara birkaç inç yakından gözlerini kısarak bakmak zorundaydı. Şimdi World Wide Web'e şükürler olsun, araştırmacı binlerce mil uzakta olabilir ve dedektör verilerini bir bilgisayar ekranında irdeleyebilir (gözlerini kısarak bakma gerekli değil).

Geiger'den ATLAS'a geçişte önemli ve ilgi çekici bir ara durak niteliği taşıdığı için bir başka dedektörden daha, kabarcık odasından bahsedeceğim. Dediklerine göre kabarcık odasının mucidi Donald Glaser çıkış fikrini, 1952 yılında yirmi beş yaşında Michigan, Ann Arbor'da bir bira bardağındaki kabarcıklar üzerinde derin derin düşünürken yakalamış. Glaser, icadı sayesinde 1960'da Nobel Ödülüne layık görüldü. Kabarcık odası bir sıvı, çoğunlukla da hidrojen içerir. Sıvı önce basınç altındadır ve bu basınç altında kaynama noktasının hemen altında bir ısı derecesinde tutulur. Ardından piston odadaki basıncı düşürmek için devreye girer. Bu düşük basınçta, sıvının kay-

nayacağı ısı derecesi daha düşüktür ve hatta (gözle görülür derecede değişmemiş olan) sıvının o andaki ısı derecesinden de düşüktür. Dolayısıyla bir an için sıvı süper ısıtılmıştır; bir diğer deyişle kaynama başlamamış olmasına karşın, ısı derecesi kaynama noktasının üzerindedir. Sıvıda parçacıkların bir veya birden fazla iyonize izi varsa, bunlar kaynamaya başlarlar ve birkaç milisaniye için de olsa, küçük gaz kabarcıklarından oluşmuş keskin sınırlarla tanımlanmış parçacık yolları odada görünür hal alırlar. En doğru anda bir fotoğraf makinesi görüntüyü çeker, böylelikle (manyetik kuvvetin genellikle büktüğü) parçacık yolları kayıt altına alınır ve araştırmacılar da çekilen fotoğrafı rahatça analiz ederler. Parçacık araştırmacıları, kabarcık odalarını otuz yıldan fazla bir süre boyunca kullandılar. Bazı kabarcık odalarının dev boyutlar aldığı da oldu, en büyüğü 20 kübik metre hacmindeydi (bu hacimde bir küre 11 adım tutar).

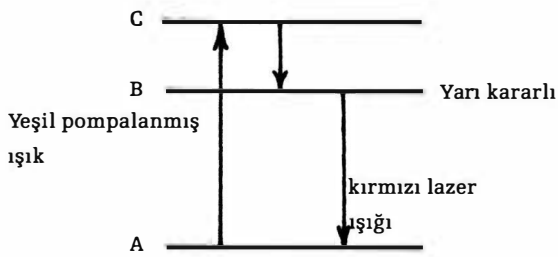
80. Lazer nasıl çalışır?

1917 yılında, genel görelilik hakkındaki muazzam çalışmasını gerçekleştirmesinin üzerinden henüz pek fazla zaman geçmemişken, Albert Einstein dikkatini tekrar radyasyon (ışınım) ve (daha sonra foton adı verilecek olan) ışık taneciklerine yöneltti ve *uyarılmış yayınım* adı verilen bir süreci keşfetti. Bunu da aslında alışılagelen biçimde laboratuarda gözlem yoluyla keşfetmedi. Işık parçacıklarının varlığına inanan az sayıda kişiden biri olarak, zamanın kuantum fiziğinden bir matematiksel analiz yoluyla ortaya çıkarttı. Fotonlara inanıyor olun veya olmayın, eğer o dönemin fizikçilerinden biri iseniz, bir atomun daha yüksek bir enerji durumuna sıçrayarak ışınım soğurabildiğini ve daha düşük bir enerji durumuna sıçrayarak da ışınım yayabildiğini bilirdiniz. Bu iki sürece Einstein *soğurma* ve *kendiliğinden* yayınım adını verdi. Işınımın kuantum kuramında genel tutarlılık gereği ve özelde de bir kovuktaki ışınım yayan enerjinin Planck'ın frekanslar arasındaki yoğunluk dağılım formülüne uyması gerçeği gereği, *uyarılmış* yayınım adı verilen üçüncü bir süreç olması gerektiğini öne sürdü. Uyarılmış yayınım, doğru frekanstan bir foton çıkıp bir atomun daha

yüksek bir enerjiden daha düşük bir enerji durumuna sıçramasına neden olduğunda, bu atomun ilkine eşlik edecek ikinci bir foton yaymasıyla gerçekleşir.

Bir atomdaki verili iki enerji durumunda, her üç süreç de aynı enerjiye sahip fotonları ihtiva eder. Düşük enerji durumunda, atom ortalama bir enerjisi olan bir fotonu soğurarak daha yüksek enerji durumuna sıçrayabilir. Yüksek enerji durumunda, kendiliğinden biçimde, kendisine özgü bir yarı-ömürle, aynı enerjiye sahip bir fotonu yayabilir ve tekrar eski düşük enerjili durumuna "düşebilir". Veya geçerliliği kabul edilen yeni süreçte, aynı enerjiye sahip bir foton atoma çarpabilir ve onun düşük enerjili duruma normalden daha erken zamanda sıçramasına neden olabilir. Einstein'ın en dikkat çekici vargılarından birisi de, uyaran foton ve uyarılmış fotonun sadece enerji yönüyle değil, yön ve hatta faz açısından da özdeş olduklarıdır; bu beraber hareket ettikleri ve beraber titreştikleri anlamına gelir. Modern terminolojiyle, evre uyumludurlar. Uyarılmış yayınım sürecinden önce, atoma yönelmiş tek foton vardır. Süreçten sonra atomdan uçarak uzaklaşan iki özdeş foton vardır.

Normalde bir atom yığınında, yüksek enerjili durumda olanlara göre, çok daha fazla sayıda düşük enerji durumunda atom bulursunuz. Aslında iki durum arasındaki verili bir sıcaklık ve verili bir enerji farkında, fizikçiler kaç tanesinin daha düşük enerji durumunda olacağını hesaplayabilmektedirler (sıcaklık konu ile ilişkilidir, çünkü daha yüksek sıcaklık daha çok sayıda atomu uyarılmış duruma iter). Uygun enerjili bir foton böylesi bir atom yığınına girdiğinde, düşük enerji durumunda rastladığı atomlar daha fazla olacaktır ve bu yüzden yayınım uyarmaktan ziyade soğurulmaya daha eğilimli olacaktır. Ancak daha fazla sayıda yüksek enerji durumunda atomla başlamanın bir yolu bulunursa, durum değişir. Gelen uygun enerjili bir foton, yüksek enerji durumunda olan daha çok atomla karşılaşacaktır ve bu yüzden soğurulmaktan ziyade, yayınım uyarmaya daha yatkın olur. Bir foton soğurulduğunda, fotonların sayısı birden sıfıra iner. Bir yayınım uyardığında, fotonların sayısı birden ikiye çıkar. Sonrasında



Resim 59: Yakut kristalindeki krom atomlarının şematik enerji düzeyi diyagramı. Dışarıdaki yeşil ışık atomları C durumuna uyarıyor, oradan hızlıca yarı kararlı B durumuna bozunuyorlar, bu B durumundaki atom sayısının A durumundakinden daha çok olması sonucunu veriyor ve uyarılmış yayınım sağanağı ortaya çıkıyor.

da ikinin dört, dördün sekiz vs olduğu bir zincirleme tepkime sağanağı olasıdır.

Fizikçiler bunları biliyorlardı, yine de uyarılmış yayınımı pratik amaçlar doğrultusunda kullanmak için otuz yıl boyunca bir edimde bulunmadılar. 1947'de Columbia Üniversitesi'nden Willis Lamb ve Robert Retherford süreci hidrojenle ilgili özel bir deneyde kontrol altına alma yoluna girdiler ve 1954'te yine Columbia'dan Charles Townes, maser'i[81] keşfetti. Buradan ileride pratik uygulama sağanağına uğrayacak olan lazerin[82] 1958'deki keşfine sıçrayalım. O yıl Townes ile Arthur Schawlow adındaki Bell Labs'ta çalışan bir araştırmacı beraberce, uyarılmış yayınım kullanarak kuvvetli bir evre uyumlu ışık demetinin nasıl yapılabileceğine dair bir makale yayınladılar. Aynı yıl sürecin patenti için başvurdular.

Townes ve Schawlow'un ortaya attığı fikri en iyi, 1960 yılında Kaliforniya'daki Hughes Araştırma Laboratuarlarında çalışan ve fikri bir lazere ilk çeviren kişi olan Theodore Maiman'ın aleti üzerinden anlatabilirim. (Aynı yıl Townes-Schawlow'un patent hakkı tanındı ve Maiman da kendisi için ayrı bir pa-

81 "microvawe amplification by stimulated emission of radiation" ifadesinin baş harflerinden oluşan bir kısaltma; "ışınımın uyarılmış yayınımı yoluyla mikrodalga yükseltme" anlamına gelmektedir.

82 "light amplification by stimulated emission of radiation": ışınımın uyarılmış yayınımı sonucu ışığın yükseltilmesi.

tent başvurusunda bulundu.) Çubuk şeklinde bir yakut kristalinden ve bu çubuğun uçlarındaki paralel aynalardan oluşur. Yeşil ışık flaşı yayabilen, neon tüpüne benzer bir tüp çubuğu çevrelemektedir. Bir devre ışıltıyı tetiklediğinde, kristaldeki krom atomları uyarılmış bir duruma doğru – buna C diyelim – sürülüyor, oradan hızlıca (saniyenin yaklaşık on milyonda biri kadar bir süre içerisinde) daha düşük bir enerji durumu olan, yine de taban durumu A'nın 1,8 eV enerji üzerinde olan B'ye bozunuyorlar (Şekil 59). Bu düşük, ancak yine de uyarılmış- enerji durumuna *yarı kararlı* denmektedir; "uzun" bir süre boyunca, yaklaşık saniyenin binde biri kadar devam eder ve atomların çoğu sonuç olarak A durumundan çok B durumunda olurlar. Uyarılmış yayınım için sahne hazırdır artık. Diyelim ki, B durumundaki atomlardan biri ani bir yayınıma uğruyor ve çubuğun bir ucundaki aynaya doğru atılan bir foton yolluyor. Bu foton yolu üzerinde aynı kendisi gibi birini tetikleyebilir veya aynaya ulaşabilir, yansır ve yayınımı uyarmak için bir şans daha elde eder. Uyarılmış yayınım sonucu sağanağa eklenen her yeni foton, daha fazla başka fotonu uyarma sürecine katılır. Belli bir anda lazer her biri aynı dalga boyunda olan ve tümü çubuğun ekseni boyunca ileri geri hareket eden kırmızı ışık fotonlarıyla dolu hale gelir. Lazer atımı buna denir. Aynalardan biri yarı saydam hale getirilirse, bu lazer ışığının bir miktarı yoğun dar bir ışına kaçar. Lazer ışınındaki enerji, yeşil ışığın parıltısıyla sağlanan orijinal enerjiden çok daha azdır; ancak dar ve yoğun bir ışın olduğu için çok faydalı bir enerjidir.

Yakut lazeri henüz müzelik olmamıştır. Halen kendisine holografi ve kozmetik cerrahi gibi bazı kullanım alanları bulmaktadır, ancak zaman içerisinde dalga boyları kızılaltından morötesi ve daha ötesine dek çeşitlilik gösteren, büyüklü küçüklü, sayısız başka lazer ona katılmıştır.[83] Bütün lazerlerde ortak o-

83 Macaristan doğumlu, hayal gücü yüksek ve karizmatik fizikçi Edward Teller bir keresinde X-ışını lazerlerinin düşman füzelerini indirmek için silah olarak kullanılmasını savunmuştu. Uyarımı sağlayacak olan da (yeşil bir flaş tüpünün yanına dahi yaklaşamayacağı bir şey olan) bir atom bombası olacaktı. X-ışını lazer çarpışması gerçekten de bir atom bombası testinde denendi de, ancak lazeri

lan bir özellik "nüfus tersinimi"; düşük enerji durumunda olanlardan daha fazla yüksek enerji durumunda atom oluşturmalarıdır. Hangi yolla olursa olsun, yansıtan aynaların yardımıyla bu bir kez başarıldı mı, lazer sağanağı gerçekleşir. Bazı modern lazerler, orijinal yakut lazeri gibi, darbeli lazerlerdir; her lazer darbesinden sonra atomlar yeniden yüksek enerji durumuna "pompalanmalıdır". Yaygın kullanılan helyum-neon lazeri gibileri ise kesintisiz biçimde çalışırlar ve nüfus tersinimi değişmez biçimde korunur.

81. Bir metalde elektronlar nasıl davranır?

Metal, elektrik (ve ısı) iletmeye yatkın bir element veya alaşımdır. Bir *iletken*dir; bu elektrik ve ısı iletmeye yatkın olmayan malzeme anlamına gelen *yalıtkan* ile karıştırılmamalıdır. İletkenler ile yalıtkanlar arasındaki iletkenlik farklılığı son derece şaşırtıcıdır, bazı durumlarda milyar kere milyar kez farklılık arz eder. Elektrik akımının bir bakır tel boyunca 100 metre yol almayı, teli kaplayan yalıtımın içine doğru yana 1 milimetre kaymaktan daha kolay bulmasına şaşırmamak gerekir.

Yalıtkan ve iletkenler arasındaki ayrımı açıklamak ve elektronların böylesi malzemelerde nasıl hareket ettiklerini açıklığa kavuşturmak için, izninizle iki elementi sülfür (mükemmel bir yalıtkan) ve bakırı (mükemmel bir iletken) karşılaştıralım. Tekil bir sülfür atomundaki on altı elektron, kendilerini (bir diğer deyişle dalga fonksiyonlarını) bir nanometrenin onda biri kadar bir boyuta yayarak üst üste binen kabuklar (yörüngeler) biçiminde düzenlerler. En dıştaki kabuk altı elektron içerir (dolu olmak için iki eksik). İzole bir sülfür atomundan bir elektron ayırmak (atomu iyonize etmek) 10,4 eV'luk bir enerji alır ("katı" bir morötesi fotonun enerjisi). Sülfür atomları toplaşarak bir katı oluşturduğunda, elektronlar kendi atomlarına bağlı kalırlar. "Valans elektronu" denen en dıştaki elektronlar, atomlar izole olduklarında sahip oldukları kendilerine

silahı çevirme düşüncesinden bir şey çıkmadı. Livermore Ulusal Laboratuarından bilimciler sonradan laboratuar ölçeğinde X-ışını lazerleri geliştirdiler ve uyarımı sağlamak için de aşırı yoğun ışık darbeleri kullandılar.

ev sahipliği yapan atomlardan ayrılma özgürlüklerini bundan böyle yitirirler. Aslına bakılırsa, bağlı elektronların enerjisi ile kaçış (iyonizasyon) enerjisi arasında *iletim kuşağı* denen bir enerji alanı vardır. Bir elektron bu kuşağa geçerse, katı madde içerisinde özgürce hareket edebilir. Ancak bu kuşağa geçmek için elektron öyle bir enerjiyle itilmelidir ki, bu enerji onu malzemeden tamamen ayıracak olandan çok daha az olmamalıdır. Ne termal tahrik ne de alelade uygulanan bir voltaj, elektronları iletim kuşağına taşımaya yetecek enerjiyi sunabilir; dolayısıyla valans kuşağı denen yere takılı kalırlar. Elbette yaşamda olduğu gibi fizikte de, asla "asla" dememek gerekir. Sülfürdeki çok az sayıdaki elektron iletim kuşağına erişebilir, dolayısıyla bu elementin iletkenliği tam olarak sıfır değildir. Ancak bakırın iletkenliğinden 10^{23} kez daha küçüktür.

İzole bir bakır atomu sülfür atomundan (yaklaşık yüzde 50) daha büyüktür. Yirmi dokuz elektronunun yirmi sekizi, kapalı kabuklarda bulunur. Kendi geniş kabuğuna sahip yirmi dokuzuncu elektron, valans elektronudur. Bir bakır atomundan bir elektronu sökmek (onu iyonize etmek) 7,7 eV gerektirir, bu sülfür atomunu iyonize etmek için gereken enerjinin dörtte üçü kadardır. Bu farkta büyük bir önem yatar. Bakır atomları katı bir metal oluşturmak üzere toplaştıklarında, iletim kuşağı sülfürdekine göre sadece daha ulaşılabilir olmakla kalmaz, aslına bakılırsa valans kuşağı ile de üst üste binerek çakışır. Bu bakırdaki valans elektronlarının, fazladan hiç enerji eklenmeksizin, kendilerini iletim kuşağında bularak malzeme içerisinde hareket özgürlüğüne sahip olmaları anlamına gelir. Valans elektronları iletim elektronları haline gelirler. Bu davranış tüm metaller için tipiktir. Bakır neredeyse en iyi iletkendir. Onu sadece gümüş geçer, o da pek fazla değil. İletkenlikleri bakırın iletkenliğine yaklaşan otuz iki metalik element daha vardır.

Metallerdeki elektronlar hakkında son bir şey daha. İletim elektronları dışarlama ilkesinden muaf değillerdir. Tekil bir atomun içerisindeki iki elektronun aynı hareket durumunda olamamasıyla uyumlu olarak, bir metaldeki iki iletim elektronu da aynı hareket durumunu paylaşamaz. Farklılık; elektronun hareketi için müsait fiziksel alandaki büyük fark yüzünden,

enerji düzeylerinin arasında buna denk bir fark olmasıdır: iletim elektronları atomun içerisinde iyi ayrılmışken, birbirine son derece yakınlaşarak bir araya gelecek şekilde baskılanırlar. Bu nedenle katı cisimlerde elektron hareketi için, atomlarda kullanılan *durumlar* ve *enerji düzeyleri* yerine, *kuşaklar* kavramını kullanırız. Öte yandan bir atomdaki elektron sayısı küçüktür, ancak iletim kuşağındaki elektronların sayısı çok büyüktür. Sonuç olarak Soru 22'de de değindiğim gibi, bir kuşakta aşağıdan yukarıya saçılan toplam enerji birkaç elektron volttur ve bu bir atomun kendi enerji durumları arasındaki aralıkla mukayese edilebilir.

82. Yarı iletken nedir?

Bir yarı iletken, adından da anlaşılacağı üzere "tam-iletmeyen" bir iletkendir. En yaygın yarı iletken, dünyadaki neredeyse tüm elektronik devrelerde kullanılan silikon elementidir (kum ve camın da temel bir bileşenidir). Oldukça ortalama rakamlarla silikonun iletkenliği bakırın iletkenliğinden trilyon kez daha azdır ve sülfürünkinden de trilyon kere daha çoktur. Silikon 14 numaralı elementtir. Dolu kabuklarında on elektron, en dış yörüngesinde ise bu yörüngeyi yarı dolu yarı boş yapan dört valans elektronu bulunur (bu yörüngede dört elektron daha az olan durum neon soygazında, dört fazlası ise argon soygazında bulunmuştur). Silikondaki "kuşak açığı" (bir elektronu valans kuşağından iletim kuşağına taşımak için gereken enerji) 1,1 eV'dir. Bu sülfür ve diğer yalıtkanlardaki açıktan çok daha az, yine de valans elektronlarının küçük bir bölümü dışındaki tümünü iletim bandına geçmekten alıkoyacak kadar da büyüktür. Dolayısıyla silikon elektriği iletebilir, ancak kolaylıkla değil.

Silikonu daha iyi bir iletken haline getirmenin (ve dahası elektriği ne kadar iyi ileteceğini kontrol etmenin) bir yolu vardır. Bu başka bir elementten küçük bir miktar "katışıklık" eklemektir. Katışık silikon sıvıyken (yüksek sıcaklıkta) eklenir. Soğuduğunda ve atomları kristalin tarzında düzenlendiğinde, saf silikonda silikon atomlarının tutacağı yerlerin bazıları, şimdi katıştırılan atomlar tarafından işgal edilmiş olur. Bu sürece

katkılama (*doping*) denir ve iki biçimde olur. Birinde, eklenen atomlar beş valans elektronuna sahiptir (silikonda ise dörttü). Bu atomların her biri kristale, malzeme içerisinde gezinme serbestliği olan fazladan bir elektron ekler. Toplamda kristal elektriksel açıdan yüksüz olacaktır; ancak bu yüksüzlük malzeme içerisinde sabit yerlerde konumlanmış (katışıktan gelen) pozitif iyonlara ve yer değiştiren negatif elektronlara sahip olmakla kazanılır. Katkılanmış bu tip bir yarı iletkene *n tipi* (n negatiften gelir), katışıklık atomlarına da *verici* (elektron verdikleri için) adı verilir. Fosfor ve arsenik, atomları verici olarak hizmet gören elementlerdendir. Katışıklığın miktarını kontrol yoluyla, iletkenlik kontrol edilebilir.

Bir yarı iletken ve onun n tipi başkalaşımı için bir örnekseme verelim. Bir balo salonu dört kişinin oturabileceği masalarla kaplanmıştır ve her masada dört kişi vardır. Pek nadiren bir kişi kalkar ve etrafta dolaşır, ancak genelde herkes yerinde oturmaya devam eder. Bu düşük iletkenliği olan saf silikona karşılık gelir. Bir süre sonra beş kişilik birkaç grup içeriye girer ve bunlardan bazı masalardaki dört kişilik grupların yerlerini almaları istenir. Bu yeni gruplarla gelenlerin her birinde sadece dört kişi oturabilir. Beşinci kişi ayakta dolaşır, ayaktaki konukların sayısı büyük oranda artar. Bu da artmış (ancak hala büyük olmayan) iletkenliği ile n tipi yarı iletkene tekabül eder.

Bir yarı iletkeni katkılamanın diğer yolu ise, en dış kabuğunda üç valans elektronu olan bir elementle olur. Böylelikle her katışıklık atomu mevzisinde, saf yarı iletkene göre bir elektron daha az olur. Bu bir elektron olmayışı durumuna *oyuk* ya da *boşluk* adı verilir ve her boşluğun kendi yaşamı vardır. Bir atomda yer alan bir elektron bir katışıklık atomuna bitişikken sıçrayabilir, böylece katışıklık mevzisindeki dördüncü elektron eksiği tamamlanır, ancak bu kez de komşu atomda bir "boşluk" oluşur. Elektron sağa doğru atlarsa, boşluk sola doğru hareket eder. Boşluk pozitif yüklü bir parçacık gibi davranır ve katkılanmış yarı iletkenin içerisinde gezinebilir. Bu biçimde değiştirilmiş bir yarı iletken *p tipi* (p pozitiften gelir) adını alır ve katışıklık atomlarına da *alıcı* (komşularından elektron al-

maktadırlar) adı verilir. Bor ve alüminyum, atomları alıcı olarak hizmet gören elementlerdendir.

Balo salonu ve dört kişilik masalarına dönersek; şimdi üç kişiden oluşan birkaç grubun içeri girdiğini ve dört kişilik grupların yerini almak istediklerini düşünün. Yeni grupların oturduğu her yerde bir boş sandalye olacaktır. Komşu dört kişilik gruplardan dost canlısı biri, boş sandalyeye oturmak için masaya gelebilir ve böylece arkasında boş bir sandalye bırakır. Başkaları da boş sandalyelere oturmak için masadan masaya geçebilir ve birkaç boş sandalye balo salonunda dolanıyormuş gibi bir izlenim doğar. İnsanlar sadece sandalyeden sandalyeye kayıyor olsalar da, artık salonda dört kişilik gruplar zamanına göre daha fazla hareketlilik vardır artık. Bu durum, boşlukların sağladığı artan iletkenlikle p tipi yarı iletkenin durumuna tekabül eder.

83. Bir p-n yüzey birleşimi nedir? Niçin diyottur?

P tipi ve n tipi yarı iletkenler, *p-n yüzey birleşimi* adı verilen şekilde birleştiklerinde olağanüstü faydalı, ilginç ve önemli hale gelirler. Balo salonu örneksemesi ile başlayıp gerçek hayata oradan geçelim. Balo salonunun tam ortasından ikiye bölündüğünü düşünün. Batı salonunda belli bir sayıda beş kişilik gruplardan olsun, böylelikle bu bölümdeki misafirler içinde yeri olmadığı için ayakta dolaşan kimseler olacaktır; doğu salonunda da üç kişiliklerden belli sayıda grup var olsun, böylece burada da misafirler boş sandalyelerin birinden diğerine geçerken bazı boş sandalyeler ortaya çıkacaktır. Sınırın yakınında batı yakasındaki fazladan ziyaretçilerin bazıları, doğu yakasındaki boş sandalyelerin farkına varacak ve onlara oturmak için diğer tarafa geçeceklerdir. Kısa bir süre sonra sınır çizgisinin iki tarafına doğru genişleyen bir bölgede ne ayakta misafir ne de boş sandalye kalacaktır. Belli bir süre daha geçtikten sonra batı yakasındaki ayakta kalmış misafirler, tüm bir orta bölgeyi aşarak artık belli bir uzaklıkta olan boş sandalyelere gitmek için harcanan zamana değmeyeceğini düşüneceklerdir. Dolayısıyla bir denge oluşacaktır ve bu dengede üç bölge vardır: Misafir fazlası olan batı, ne

fazladan misafiri ne de boş sandalyesi olan orta ve bir miktar boş sandalyesi olan doğu.

Bir p-n yüzey birleşiminde n tipi ve p tipi yarı iletkenlerin temas noktasına yakın orta bölgeye *tükenme bölgesi* (hem elektronlar hem de boşluklar tükendiği için; ayrıca *engel bölgesi* veya *boşluk bölgesi* de denir) adı verilir. İnsan ölçeği açısından düşündüğümüzde küçük, ancak atomik ölçekte büyük bir bölgedir; on binlerce ya da yüz binlerce atom büyüklüğüne kadar çıkabilir. Bir p-n yüzey birleşimini dengeye kavuşturan (ya da örneksememizin dilini kullanırsak n tipi bölgedeki bir elektronu, p tipi bölgeye geçmek için "harcanacak zamana değmeyeceğini düşündüren") şey, tükenme bölgesinde oluşmuş voltaj farkıdır. Bu elektronları kendi taraflarına iterek akıma bir son vermektedir.

Yeni durumda bir fizikçi p-n yüzey birleşimine, birleşimin kendisinin sunduğuna ek olarak, ayrıca bir dış voltaj uygulayabilir. Bu dış voltaj iç voltajla aynı yöndeyse (aynı işarete sahipse), elektron akımına karşı durma etkisini kuvvetlendirir. Akım gerçekleşmez. Dış voltaj iç voltaja zıt ve ondan büyükse, iç voltajın geciktirici etkisini alt eder. Sadece elektronların n tipi bölgeden p tipi bölgeye akışına izin vermekle kalmaz, aynı zamanda buna teşvik eder. Akım gerçekleşir. Dolayısıyla p-n yüzey birleşimi bir diyottur, akımın bir yönde gerçekleşmesine izin veren ve diğer yönde gerçekleşmesine ket vuran bir devre elemanıdır.[84]

Balo salonuna (son defa) dönersek, üç bölgesi olan balo salonunun bir gemi üzerinde olduğunu varsayalım bu kez. Gemi yana yatıp doğu tarafını yukarı doğru kaldırırsa, batı yakasındaki fazla misafirler doğu yakasında kalan boş sandalyelere geçmeye daha da az istek duyacaklardır. İnsan "akımı"

84 Elektrik devreleri üzerine benim çalıştığım katı-hâl-öncesi-çağda bir diyot, elektron yayan ısıtılmış bir katot içeren bir vakum tüpü ve bu elektronları çeken veya iten bir küçük soğuk plakadan oluşurdu. Plakaya pozitif bir voltaj uygulandığında elektronları çeker ve tüpten akım geçerdi. Negatif voltaj uygulandığında akım dururdu. (Isıtılmış katotlar halen bazı bilgisayar ve televizyonların içindeki katot ışını tüplerinde bulunur.)

gerçekleşmez. Gemi ters yöne yatıp batı yakasını kaldırırsa, o taraftaki fazladan misafirler doğu yakasına (tepe aşağı) hareket ederek inmek için fazladan bir istek duyacaklardır. İnsan "akımı" gerçekleşir. (Kısa zaman içinde balo salonunun batı tarafında ayakta fazladan kimse kalmayacak ve akım duracaktır. Bir devreye bağlı p-n yüzey birleşimi bu kadere mahkûm kalmaz. Dışardan uygulanan voltaj n tipi bölümdekilerin ikmali için hiç durmayan, kesintisiz bir elektron kaynağı sağlar.

84. Diyotlar nerelerde kullanılır?

Bir p-n yüzey birleşmeli diyot, akımın bir yöne akmasına izin verip diğer yöne akmasını engelleyen bir tek yönlü kapakçık olarak kullanılabilir. Ancak bazıları büyük pratik değere sahip başka kullanım alanları da vardır ve bu uygulamaların tümü, p-n yüzey birleşmesinde doğru "isteklendirme" sağlanırsa tükenme bölgesinin bir tarafında askıda olan elektronların diğer tarafa sıçramaya hazır olmaları gerçeğiyle ilişkilidir. Burada birkaç uygulamayı ele alacağız.

Kısaca LED[85] denen ışık yayan diyotta, uygulanan voltaj diyot vasıtasıyla bir akım yollar ve elektronların bazıları bölmenin bir ucundan diğer ucuna kelimenin tam manasıyla atlayarak bu esnada fotonlar yayarlar. Diyotun iki tarafı arasındaki enerji farkı, malzeme seçimi (illa silikon olması gerekmez) ve katışıkların miktar ve çeşidi yoluyla ayarlanarak düzene koyulabilir. Dolayısıyla bu ışığın renginin ayarlanabileceği anlamına gelir, çünkü ışığın rengi foton enerjisi tarafından belirlenir. 1,5 eV veya daha az bir fark, gözle görülmeyen kızılaltı ışık; 4,0 eV veya daha fazla bir fark, gözle görülmeyen morötesi ışık sonucunu verir. 1,5 ile 4,0 eV arasındaki fark enerjileri, görünür ışığın kızıldan mora herhangi bir rengini elde etmek için kullanılabilir. Kırmızı LED'lerin ilk ortaya çıkışı elde taşınır hesap makinelerinin ekranlarına, yani 1960'lı yıllara kadar uzanır. O zamandan bu yana bilimciler ve mühendisler LED'lerin sadece her rengini değil, daha yüksek yoğunlukta olanlarını da yapmayı öğrendiler. Bugün el fenerlerinden trafik ışıklarına, o-

85 LED: Light-Emitting Diode, ışık yayan diyot.

tomobil fren ışıklarından, en belirgin biçimde de, şehirlerdeki ve spor stadyumlarındaki büyük video görüntülerine dek her yerde görülüyorlar. Gelecekte otomobil farları ve ev ışıklandırması dâhil, çok daha geniş bir kullanım alanına sahip olması beklenebilir. Diğer katı-hal aydınlatma aletleri gibi LED'ler de uzun ömürlü ve akkor telli lambalara göre çok daha enerji tasarrufludurlar.

Doğru koşullar altında, ışık yayan diyot bir lazer diyotuna dönüştürülebilir. Bu "sadece aynalar eklemek" kolaylığında olmaz, ama bu tarzda olur. Diyotun bir tarafındaki diğer tarafa atlamak için bir tetikleme bekleyen elektronlarla, yüksek enerji durumlarının düşük enerjilere göre daha çok doldurulduğu, etkin bir nüfus tersinimi gerçekleşir. Elektronların sıçramasını ve foton yaymasını tetikleyen akım, aynı zamanda elektronları takviye eder ve böylece bir nüfus tersinimi sağlar. Eğer bir çift ayna diyotu çevrelerse, bir yönde yayılmış olan ışık yansıtılabilir ve daha fazla fotonu yayılmak üzere uyarabilir. Bu fotonlara gelince, onlar da daha çok fotonu uyarabilir ve yoğunluğu bir yönde arttırarak bir lazer ışınını oluştururlar. Her lazerdeki temel özellikler olan nüfus tersinimi ve uyarılmış yayınım, küçük bir diyotta kapsüllenmiş olur. Süpermarketlerde hesap görülen kasalarda lazer diyotları artık eski gaz tüpü lazerlerin yerini almaktadır. Ve giderek daha fazla öğretim üyesi de lazer diyot kalemi olmaksızın yapamaz hale geliyor.

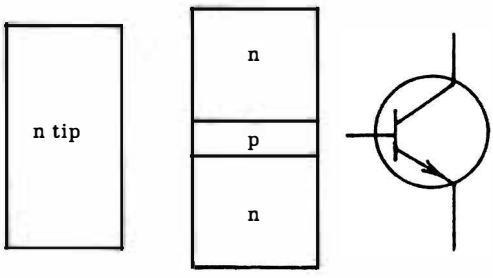
Katı hâl diyotlarının bahsettiğimiz iki kullanımında da ışık yayınımı sözkonusu. Diğer uygulamalar tersi olan süreçten, elektrik akımı yaratmak için ışık soğurulmasından faydalanıyorlar. Bir foton p-n yüzey birleşimi yoluyla soğurulduğunda, yüzey birleşiminin p tipi tarafından n tipi tarafına bir elektronu yukarıya doğru (enerji açısından yukarı doğru) sürebilir. Sonuç olarak bir elektron ve bir boşluk yaratır ve bunları kendi taraflarına yollar. Eklenen enerji bir akım meydana getirebilecek bir voltaj sağlar. Net sonuç LED'de olanın tam tersidir. Akımın ışık yaratmasının yerine, burada ışık bir akım yaratır. En basit uygulaması ışıkla harekete geçen şalter, daha iyi bir ifadeyle *karanlık-etkileşimli şalter*dir. Genellikle bu uygulamada bir ışık ışını sabit bir akım sağlar.

Bir şey ışık ışınını engellediğinde, ışıkla harekete geçen akım durur ve bu şalteri attırır.

İnsan soyunun sürdürülebilir geleceği dâhil, çok sayıda nedenden ötürü p-n yüzey birleşimli diyotun en önemli uygulama alanı güneş pilidir (fotovoltaik pil de denir). Elde taşınan bir hesap makinesine güç sağlama veya yörüngedeki astronotların ihtiyaç duydukları enerjiyi karşılama gibi bazı uygulamalarda pilin randımanı –gelen ışık enerjisinin ne oranda elektrik enerjisine çevrildiği– en büyük bahis mevzuu değildir. Ancak büyük ölçekli kullanım sözkonusu olduğunda, güneş pillerinin fosil yakıt güç kaynaklarının yerini alması açısından, maliyet ve verimlilik kritik parametreler haline gelmektedir. Son yarım yüzyılda güneş pilleri üzerine yapılan araştırmaların çoğu, pillerin daha verimli çalışmasına yoğunlaştı. Elektronlar ve boşluklar da gezegeni kurtarmak için üzerlerine düşeni yapacaklar.

85. Transistör nedir?

Transistör için yirminci yüzyılın en büyük icadı denir. İşleyişinin kavranması zor değildir, ancak 1947'de (1948'de duyuruldu) New Jersey'deki Bell Laboratuarları'nda John Bardeen, Walter Brattain ve William Shockley tarafından icadı, katı hâl kuantum fiziğinin derin bir kavranışını, ancak kuantum ilkeleri atom ve moleküllere uygulandıktan sonra ortaya çıkabilen bir kavrayışı gerektirdi. (Bardeen, Brattain ve Shockley icatlarından dolayı 1956 Nobel Fizik Ödülü'nü paylaştılar.



Şekil 60: Bir parça n tipi yarı iletken (a) ortadan kesilir ve p tipi bir iletken parçası araya yerleştirilirse, sonuç alışılagelen sembolü (c)'de gösterilen, bir n-p-n transistörü (b) olur.

Bardeen, 1972 yılında süperiletkenlik üzerine çalışmasıyla Nobel almaya devam etti.) Burada transistörün basit bir biçimini ele alacağız.

Öncelikle bir parça silikonun n tipi bir yarı iletken haline getirilmesi için arsenikle veya başka bir katışıkla katkılanmış olduğunu düşünelim (Şekil 60a). Katışıklığın miktarı tarafından belirlenen belli bir iletkenliğe sahiptir. Şimdi bunu ortadan ikiye kesin ve iki yarı arasındaki yere ince bir p tipi yarı iletken parçası yerleştirin (Şekil 60b). Bu yolla iki p-n yüzey birleşimini sırt sırta vermiş oldunuz. Ancak burada önemli olan, orijinal yarı iletkenin iletkenliğini bozmuş ve kendinizi kontrol pozisyonuna yerleştirmiş olmanızdır. Yerleştirdiğiniz ince parçaya uyguladığınız voltaj aracılığıyla aletten geçen akımı kontrol edebilirsiniz. Orijinal parçanın iki ucuna bir voltaj farkı (diyelim ki, alta negatif üste pozitif) uygulanırsa, elektronlar alttan üste doğru akmaya meyledeceklerdir. Ortadaki ince parçaya pozitif voltaj uygularsanız, bu elektronları çekecek ve akışı arttıracaktır. Elektronların bazıları merkez parçadan geçerken yön kaybına uğrayacaktır, ancak çoğunluğu orijinal yarı iletkenin üst tarafına doğru olan yollarına devam edeceklerdir. Ortadaki parçaya negatif voltaj uygularsanız, elektronları geri itecek ve akım büyük oranda azalacaktır.

Dolayısıyla transistörün bir amplifikatör (yükseltgeç) olduğunu söyleyebiliriz. Ortadaki parçaya uygulanan küçük bir değişken voltaj, alette büyük bir değişken akımın oluşmasıyla sonuçlanacaktır. Transistör bir devre anahtarı rolü de görebilir. Ortadaki parçanın voltajının işaretini değiştirmek, ana akımı açıp kapamayı sağlar. Transistör aslında bir "triyot"tur.[86]

86 Elektronik devrelerin katı-hâl-öncesi günlerinde, bir triyot üç eleman içeren bir vakum tüpüydü: Elektron yaymaya yarayan bir ısıtılmış katot, elektron toplamaya yarayan pozitif yüklü *anot* adı verilen bir plaka ve onların arasında *ızgara* adı verilen, voltajı katottan anoda ne kadar akım geçtiğini kontrol etmeye yarayan bir sarılmış tel yumağı (aslında alışılagelmiş akım yönü tersidir, pozitiften negatife). Transistördeki üç öğe, eski triyotlardaki üç öğeyle neredeyse tıpatıp aynıdır; sadece transistör daha küçüktür (*çok daha* küçüktür), daha az enerji israf eder ve yanıp yok olan bir katodu yoktur.

Üç öğesi ve dış dünyaya bağlanan üç teli vardır. Şekil 60'da resmedilen transistörde alt taraf'a *yayıcı* (kolektör; elektron yayar), üst taraf'a *toplayıcı* (emitör; elektron toplar) ve ortadaki parçaya da *taban* (beyz) denir. Şekildeki transistör bir *n-p-n transistörü*dür. Aynı performans bir p-n-p transistörüyle de elde edilebilir.

Modern transistörler artık ayrı devre elemanları değil, bir silikon kristale gömülü; dış dünyaya tellerle bağlanan değil, yanındaki gömülü aletlere minik iletken malzeme parçaları aracılığıyla bağlanan ve Şekil 60'da basitleştirilerek gösterilenden çok daha karmaşık bir yapıya sahiptirler. Ancak 1948'den bu yana gerçekleşen müthiş teknik gelişmeler başka bir kitabın konusu.

XIV. Bölüm

Tüm Ölçeklerde Kuantum Fiziği

86. Kara delikler neden buharlaşır?

Kara delikler ilk kez 1968 yılında John Wheeler tarafından adlandırıldı, ciddiye alındı, teorik olarak keşfedildi, en sonunda da doğadaki varlıkları tespit edildi; tüm bunlar kuantum fiziğine başvurmaksızın başarıldı. Tamamen klasik birer nesne gibi görünmekteydiler. Aslında Wheeler, bir yerde kuantum fiziğinin dünyayı kara deliklerden kurtaracağını umuyordu. Madde ve enerjinin bir noktaya sıkıştığı ("tekillik") bu acayip varlıklara inanmak istemediğini söylemişti. Atom-altı ölçekte kuantum fiziğinden gelecek bir katkının çöküşe bir son vererek, bütünsel bir çöküş olmasını engelleyebileceği umudunu taşıyordu. Belki yaşamının sonuna ulaşmış bir ağır yıldız, bir kara delik oluşturmaya doğru gitmeden, çok küçük bir nesne olacak şekilde çökebilir, düşüncesindeydi. Ne var ki, onun bir kaçış yolu olarak kuantum fiziğini kullanma çabası başarısızlıkla sonuçlandı. En sonunda kara deliğin, yeterli büyüklükte

kütleye sahip "soğuk, karanlık maddenin" (göreli soğuk, yani nükleer süreçler seyrini izledikten sonra) kaçınılmaz kaderi olduğu soncuna vardı.

Kuantum fiziği, kara delik hikâyesine daha dolaylı bir yol izleyerek tekrar girdi. Kara delikler ilk ciddi araştırmaların konusu oldukları zaman, teorik hesaplamalar onların oldukça basit varlıklar olduklarını gösteriyordu; sadece kütle, elektrik yük ve açısal momentum tanımlanmaları için yeterliydi. Bir kara delik oluşturmak üzere çöken (veya sonradan kara deliğin içine çektiği) maddenin özellikleri, lepton numarası, baryon numarası, kuark çeşnisi vs gibi, her ne olursa olsun tümü kayboluyordu. Bu genellikle bilgi kaybı olarak adlandırılır ve bugün bile fizikçiler bilginin kara delikte kayıp mı olduğu, yoksa sadece ileride olası bir geri kazanım için depolandığı mı konusunda farklı fikirlere sahiptirler. Wheeler kara deliklerin bu görünür yalınlığını "kara deliklerin saçı yok"[87] diyerek vurgulamıştır. Bir oda dolusu insan, kel olmayıp saçları olsa birbirlerinden daha kolay ayırt edilebilirler. Yine de Wheeler bu "saçsız" kara deliklerin varlığından hoşnutsuzdu. Yalınlıkları pek az bir entropiye veya hiç entropiye (entropi düzensizliğin ölçüsüdür) sahip olmadıklarına işaretti. Maddenin karmaşık ve düzensiz birikiminden oluşan bir kara deliğin, kendisine çektiği maddenin büyük entropisini devralmaması kafa karıştırıcı bir durumdu.

Wheeler'ın otobiyografisinde[88] anlattığına göre, 1972 yılında yüksek lisans öğrenci Jacob Bekenstein'la beraber otururken (aklımda kaldığı kadarıyla aktarıyorum) şöyle demiştir: "Bir bardak buzlu çayın hemen yanına bir fincan sıcak çay koyarak bu ikisinin ortak bir sıcaklığa ulaşmalarını beklediğimde kendimi bir suç işlemiş gibi hissediyorum. Çünkü evrenin entropisinde bir artışa katkı vermiş oldum, hem de zamanın sonuna kadar yankılanacak bir artış bu, bunu geri almanın veya silmenin bir yolu yok. Ancak sıcak çay ve soğuk çayı denk

87 Richard Feynman, Wheeler'ı münasebetsizlik yaptığı için ayıplamıştır.

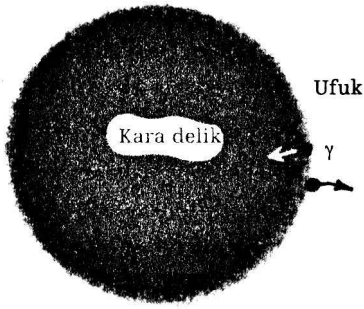
88 *Geons, Black Holes, and Quantum Foam: A Life in Physics* (New York: W. W. Norton), s.314

düşürüp bir kara deliğe dökersem, hiç suç işlememiş oluyorum. Evrendeki entropinin artışına katkım olmadı. Cezadan kurtuldum." Bekenstein bu yarı şaka düşünceyi ciddiye aldı. Birkaç ay ortadan kayboldu, ardından Wheeler'ın ofisine döndü ve Wheeler'ın cezadan kurtulmadığını açıkladı. Bir kara delik entropiye sahip olabilir, dedi ve entropisi "olay ufku"nun alanı ile ölçülür. (Olay ufku bir kara deliği saran ve kaçışın mümkün olduğu ve olmadığı alanları birbirinden ayıran kuşaktır.) Çayı kara deliğin içine dökmek kütlesini bir parça arttırır, dolayısıyla ufuk alanını arttırır, ve Bekenstein'a göre entropisini de arttırır. Stephen Hawking, bundan iki yıl önce, bir kara deliğin ufkunun alanının asla azalamayacağını ispatladı. Bu Bekenstein'ın vargısıyla uyumludur, çünkü entropi de asla azalamaz (bu termodinamiğin ikinci yasasını ifade etmenin bir başka yoludur).

Görünüşe göre ilk başta, Hawking dâhil olmak üzere önde gelen kara delik araştırmacıları bir kara deliğin entropisinin olmayacağı veya çok az olacağı düşüncesine sarılmaya devam ettiler ve Bekenstein'ın savına karşı mesafeli durdular. (Wheeler hatırladığı kadarıyla şöyle demiş: "Fikrin o kadar çılgınca ki, doğru olabilir. İlerlemeye devam et ve bunu yayınla.") Yine de Hawking, Bekenstein'ın iddiası üzerine düşündü ve bunu değerli buldu. Hatta bu fikir onun kara delikler hakkında en dikkat çekici vargılardan birine ulaşmasında esinleyici oldu. 1974 yılında kara deliklerin dış dünyadan tamamen ayrıksı olmadıkları düşüncesini ortaya attı. Işıyabilir, ışınım yayabilirlerdi. Sadece entropiye sahip değillerdi, entropilerinin doğal sonucu olarak bir sıcaklığa da sahiptiler ve bu doğrultuda, Güneş'in yüzey sıcaklığından dolayı ışınım yayması gibi, kara delikler de dışarıya enerji (ve kütle) yayıyorlardı. Hawking'in çalışması, bir kara deliğin sıcaklığının (sadece kütlesine bağlıdır) hesaplanmasını ve *Hawking ışıması* veya bazen de *Bekenstein-Hawking ışıması* adı verilen yoğunluğun hesaplanmasını mümkün kıldı. Birkaç güneşlik bir kütleye sahip bir kara deli-

ğin sıcaklığı mutlak sıfırın on milyonda bir dereceden daha az üstündedir ve öyle yavaş bir oranda ışınım yayar ki, kütlesinde milyarlarca yıl boyunca dikkate değer bir azalma olmaz. Daha küçük kara deliklerin sıcaklığı daha yüksek ve ışıma oranları da daha büyüktür. Küçüklüğü atom-altı düzeyde olan bir kara delik, eğer varsa, öyle yüksek bir sıcaklığa sahip olabilir ki, kalan kütlesini saniyenin kesirleri içerisinde ışınım biçiminde yayarak oldukça hızlı bir astronomik olay gerçekleştirmiş olur. Astronomlar (gökbilimciler), şu güne dek nafile yere, minik kara deliklerin son anlarını aramaya devam ettiler.

Şimdi kuantum fiziği öykümüze tekrar giriş yapıyor. Fizikçiler Hawking'in kuramını ve Hawking ışımasının gerçekliğini kabul ettiler. Ancak yine de şu soruyu sormaktan geri durmadılar: "*Mekanizma* nasıl işliyor? Bir kara delik, eğer varsayımsal olarak hiçbir şey ondan kaçamıyorsa, nasıl enerji yayabilmektedir?" Görünür paradoksa tek güvenilir çözüm kuantum fiziği tarafından sağlandı. Sanal parçacıklar, belirsizlik ilkesi ve maddenin dalga doğası, tüm bunlar hesaba katıldığında ufuk tamamen keskin bir sınır olmaktan çıkıyor. Hatları biraz daha belirsiz bir hale geliyor. Ardından tıpkı tünellemede olduğu gibi, klasik olarak olanaksız olan kuantum mekanik açıdan olanaklı hale geliyor. Ufka yakın yerde bir sanal parçacık çiftinin oluştuğunu hayal edin (Şekil 61). Normal boş uzayda her zaman böylesi sanal parçacıklar oluşur ve hemen ardından yok olurlar (Soru 7'ye *bkz.*). Ancak böylesi bir çift, bir kara delik ufkuna yakın yerde oluşturulduğunda, kütleçekimin



Resim 61: Bir kara deliğin flulaşan ufkunun kıyısında, bir sanal parçacık çifti hızlıca yeniden birleşmek yerine, birinin uzağa "ışınması" sonucu sonsuza dek birbirlerinden ayrılabilirler.

olağanüstü çekişi onları kalıcı olarak ayırmaya yetebilir. Biri kara deliğin içerisine doğru emilirken, diğeri evrenin içerisine doğru sürgüne yollanır. Süreç boyunca kara delik başlangıçta çok çok yavaş biçimde, nihayetindeyse artan oranda kütle kaybeder.

Birbirlerinden ayrılan ve sürgüne gönderilen bu parçacıklar nedir? İlk önce, hemen tümü fotondur. Kara deliğin sıcaklığı, sadece sıfır-kütleli parçacıkların yer alabileceği düşüklüktedir. Dolayısıyla Hawking ışıması elektromanyetik bir ışınımdır, en azından kara delik iyice küçülüp sıcaklığı artıncaya kadar. Ondan sonra nötrinolar ve en nihayetinde diğer daha kütleli parçacıklar da sanal parçacık dansına giriş yapabilirler.

87. Güneş'in merkezinde kuantum fiziği nasıl işler?

Güneş'in merkezinde sıcaklık yaklaşık 15 milyon derecedir. Sıcak evet, ancak kuantum fiziğinin yardımı olmasa yeterince sıcak değil. Bu sıcaklıkta protonlar yaklaşık olarak ortalama 2.000 eV'luk bir hareket enerjisi ile uçuşurlar. Doğrudan karşılaşma sözkonusu olduğunda, bu enerjiyle iki proton birbirlerine aralarındaki elektrik itki yüzünden birkaç yüz fermiden daha fazla yaklaşamazlar. Bir fermi yaklaşık 10^{-15} m ile tekil bir protonun boyutlarına yakın bir büyüklüktür; dolayısıyla kafa kafaya bir karşılaşmada bile birbirlerine temastan, birbirleriyle kaynaşma ve nükleer enerji açığa çıkarmaktan uzaktırlar. Karışımda bazı protonların hareket enerjisi ortalamanın üzerindedir. Bu onların birbirine daha fazla yakınlaşmasını sağlar. Bir trilyonda birden daha azı, ortalamanın otuz katı kadar büyüklükte bir enerjiye sahip olur. Bu kadar çok enerjiye sahip nadir özellikteki proton dahi, elektrik itkiyi ancak başka bir protona yaklaşık 12 fermi yaklaşacak kadar alt edebilir.

Klasik fiziğe göre o zaman, Güneş'in merkezindeki çok yüksek sıcaklığa karşın, protonlar birbirlerine iç içe geçecek ve enerji açığa çıkarmaya yetecek kadar yakınlaşamamaktadırlar (elbette böyle bir enerji açığa çıkarma olmasa, Güneş'in merkezi bu kadar sıcak *olmazdı*). Güneş'in içerisinde kuantum tünelleme sayesinde çekirdeklerin iç içe geçerek birleşebileceği

fikri, ilk kez 1929 yılında Gallerli fizikçi Robert Atkinson (otuz bir yaşındaydı) ve Alman fizikçi Fritz Houtermans (yirmi altı yaşındaydı) tarafından ortaya atıldı. Tünellemenin alfa bozunumunu açıklamak üzere ortaya atılışının henüz bir yıl sonrasıydı (*bkz.* 35. ve 70. sorular). Atkinson daha sonra yıldızlarla ilgili nükleosentez fikrinden dolayı Nobel'e layık görüldü; bugün daha iyi temellendirilmiş olan bu fikir, tüm ağır elementlerin yıldızlardaki birleşme (füzyon) tepkimesi sonucu oluşmuş olmasıydı. Fikirlerini sakınmayan bir komünist olan Houtermans ise zor bir hayat geçirdi. 1930'larda Sovyetler Birliği'nde çalışmayı kabul etti, ancak kendisinden şüphelenildi ve hapsedildi. 1939'daki Hitler-Stalin paktından sonra Nazi Almanya'sına iade edildi ve bu kez orada hapsedildi ve ancak Alman atom bombası projesinde çalıştırılmak üzere serbest bırakıldı. II. Dünya Savaşı'nın ardından İngiltere'deki Farm Hall'de enterne edilen Alman bilim adamları arasındaydı.[89]

Atkinson ve Houtermans kafalarında Güneş'in içerisinde ağır çekirdeklerin hafif çekirdeklerin birleşmesi için katalizör rolü oynadıkları bir süreci canlandırıyorlardı. Bundan sekiz yıl sonra 1937'de bu kez, tünelleme olgusunu ilk ortaya atan bilimcilerden biri olan George Gamow ile Edward Teller karbon çekirdeklerinin katalizör rolü oynadıkları bir füzyon döngüsü fikrini öne sürdüler. Köken olarak Rusya'dan gelen Gamow ile bir Macaristan göçmeni olan Teller o kesitte beraberce Washington, D.C.'deki George Washington Üniversitesi'ndeydiler ve 1938 yılında yıldızlardaki enerji konusuna odaklanacak bir konferansın planlanmasıyla meşguldüler. Konferansa Hans Bethe'yi de (o dönem Cornell Üniversitesi'nde olan bir Alman göçmeni) davet ettiler, Bethe de o kesitte tanınmış bir nükleer fizikçi olarak yıldızlardaki nükleer reaksiyonların rüzgârına kapıldı. 1939 yılında Bethe Güneş'teki (ve diğer yıldızlardaki) enerji üretimi üzerine bir çalışma yayınladı, çalışması kuantum tünellemeyi içeriyor ve ilk kez yıldızlardaki füzyonun anlaşılması için ayrıntılı bir kuram sunuyordu. Çalışması

89 Farm Hall hikâyesi Jeremy Bernstein'ın *Hitler's Uranium Club: The Secret Recordings at Farm Hall* (New York: Springer, 2010) kitabında anlatılır.

için 1967'de Nobel Ödülüne layık görüldü. Bethe sonrasında Teller'in kendisine yol göstericiliğinin hakkını vererek "Benim ünümün sorumlusu Edward'dır" der.[90]

Tünellemenin, kuantum fiziğinin bu küçük ve acayip özelliğinin, yıldızların parlamasının nedeni olduğu ortaya çıktı.

88. Süper iletkenlik nedir?

Daimi hareket küçük ölçekli dünyada sık görülür. Atomlardaki elektronlar hiçbir zaman yavaşlamazlar. Nükleonlar asla yorulmazlar. Evrende sürtünme o kadar azdır ki, hareket (gezegenlerin, yıldızların ve galaksilerin hareketi) neredeyse daimidir. Ancak bizi saran gündelik yaşamda daimi hareket, pratik açıdan karşımıza çıkmaz. Bir devridaim makinesinin patentini almaya çalışmayın. Başarılı olamazsınız. Aristo'nun bir şeyi hareket ettirmek için bir kuvvetin gerektiğini düşünmesine şaşmamalı. Gündelik deneyimimiz içerisinde ittirilmeyen veya çekilmeyen bir şey hareket etmez. Ve elektrik akım en iyi iletkenlerde bile dış bir voltaj olmazsa sönümlenir.

Süper iletkenlik ve süper akışkanlık insan ölçekli dünyada daimi hareket yasasına karşı gelen kuraldışı örneklerdir. 1911'de Leiden Üniversitesi'nden bir Hollandalı fizikçi, Heike Kamerlingh Onnes cıva elementinin, soğutularak mutlak sıfırın dört derece üzerinde olan sıvı helyumun sıcaklığına getirildiğinde (bu sıcaklıkta cıva, helyum *dışındaki* her şey gibi, katıdır), elektriği direnç olmaksızın ilettiğini keşfeder. Çok küçük bir dirençle değil, gerçek anlamıyla *sıfır* direnç. İşte böylesi bir malzemeye süper iletken adı verilmektedir. Sıfır direncin ne anlama geldiğini anlamak için, gözünüzün önüne, halka şeklini alan ve içerisinde bir akım dönen bir süper iletken getirin. Bu akım dışarıdan herhangi bir dürtü olmaksızın sonsuza dek dönmeye devam edecektir. Bu durum tekil bir atom içerisinde direnç olmaksızın dönen bir elektronun yörüngesinin milyar kat artmasına benzemektir.

90 Daha sonraları 1950'lerde Bethe ve Teller termonükleer silahların geliştirilmesi konusunda birbirinden ayrışan fikirlere sahip oldular ve hükümete zıt yönde tavsiyelerde bulundular, ancak birbirlerinin bilimsel yeteneklerine saygı göstermeye ve en azından yüzeysel biçimde dost kalmaya devam ettiler.

Yıllar geçtikçe bilimciler süper iletkenlerin içlerinde manyetik alanların olmaması gibi çeşitli özelliklerini keşfettiler ve daha yüksek "geçiş sıcaklıklarında" süper iletken haline gelen yeni malzemeler buldular. 1950'lerde 18 Kelvin (mutlak sıfırın 18 derece üstü), 1980'lerde 30 Kelvin ve bugün 100 Kelvinin üstüne ulaştılar. Bu "yüksek-sıcaklık" süper iletkenlerinin (görelidir sonuçta) neden böyle davrandıkları bir gizem olarak kaldı. Ancak 1957 yılında üç Amerikalı fizikçi John Bardeen, Leon Cooper ve John Schrieffer tarafından ortaya atılan kuram, düşük-sıcaklık süper iletkenlerinde ne olup bittiğinin betimlenmesi açısından destek buldu. BCS kuramı denilen (tam tasviri yüksek matematiksel bir nitelik taşıyan) bu kuram hakkında en azından kabaca bir fikir vermeme izin veriniz.

İyi bir iletkende (örneğin bakır veya alüminyum), elektronlar malzemenin içerisinden göreli rahat biçimde geçebiliyorlar diyoruz. Bir iletkeni bir yalıtkandan ayıran budur. Ancak sıradan iletkenlerin en iyisinde bile elektronlar, içinden geçtikleri kristal örgüde pozitif iyonlarla arada bir enerji takas ederken belli bir sürtünmeyle (belli bir dirençle) karşılaşırlar. Bu karşılaşmalarda elektronlar bir miktar enerji kaybederken, iyonlar daha sonra malzeme boyunca ısı olarak harcanacak bir enerji kazanırlar. Elektriği taşıyan bir iletken ısınır. İletkenin sıcaklığı düşürülünce iyonların termal tahriki azalır, geçen elektronlar yoluyla iyonlara enerji kaybı azalır ve direnç küçülür, ancak sıfıra ulaşmaz. (Çoğu süper iletken, paradoksal olarak oda sıcaklığında iyi iletken değildir.)

BCS kuramının altında Leon Cooper'ın (teorik) keşfi olan, bazı malzemelerde yeterince düşük sıcaklık altında elektronların bağlı çiftler oluşturabildiği gerçeği yatmaktaydı. Cooper'ın o dönem Illinois Üniversitesi'nde çalışma arkadaşları olan David Pines ve John Bardeen, epeydir elektrik itkilerine rağmen elektronların bazı katılarda birbirlerini çekebildikleri sonucuna varmışlardı. Cooper buna zayıf çekimin, malzeme içerisinde ayrı varlıklar olarak hareket edebilen çiftler oluşturmak için yeterli olacağı yaklaşımını ekledi (bunlara şimdi *Cooper çift-*

leri diyoruz). Çekimin mekanizması şöyle işlemektedir: Malzeme içerisinden geçen bir elektron, yakınındaki pozitif iyonları kendisine -deyim yerindeyse kıskaca alarak- çeker. Ardından onu izleyen bir elektron, önünde pozitif yükün bu hafif toplaşmasını görerek oraya doğru çekilir, böylelikle önündeki elektron tarafından çekilmiş olur. Bu çekimi gerçekleştiren bowling topu değil, yatak olmasına karşın; yatakta çukur yaratan bowling topunun başka bir bowling topunu kendisine "çekmesine" benzetilebilir. Yatağın deformasyonu yeterince büyükse, iki bowling topunun taşıdıkları yükler birbirini iten türde olmasına karşın, iki top arasındaki gözle görülür çekim devam eder.

Bir Cooper çifti iki fermiyondan oluştuğu için bozon olarak davranır, bu birçok çiftin aynı hareket durumuna birlikte yerleşebileceği anlamına gelir. Dışarlama ilkesi onlar üzerinde etkimez. Çiftleri ayırmak ya da birini çekmek enerji gerektirir –kesin konuşmak gerekirse fazla bir enerji değil, ancak aşırı düşük sıcaklıkta çiftleri açıp malzeme içerisinde direnç olmaksızın hareket edebilmelerini sağlamak için yeterince termal enerji yoktur. (Çiftler hakkındaki en garip şeylerden biri, bir çift oluşturan iki elektronun birbirinden ayrılmasının, bir çiftin diğer bir çiftten ortalama ayrılmasından daha büyük olmasıdır. Durum, Cooper çiftleri için sadece bir şerit olması haricinde, bir kamyonun uzunluğunun kamyonların ortalama ayrılmasından daha büyük olduğu çok şeritli bir karayolundaki yarı römork kamyon kalabalığına benzer.) Burada aktardığım bütünsel bir kuramın soluk bir yansıması sadece, ancak temel bir noktayı yakalıyoruz: Cooper çiftleri kristal örgüden engelsizce sızmaktadırlar, çünkü örgü onları tahrip edecek yeterli termal enerjiye sahip değildir.

Bir çemberde akan her akım, çemberden geçen bir manyetik alan yaratır. Elektromıknatıslar böyle oluşturulur. Çember bir süper iletkenden yapılmışsa, o zaman yeni bir kuantum etkisi kendisini gösterir. Manyetik akı (alan şiddeti ve geçirgenliğinin birleşik ölçüsü) kuantizedir. Açısal momentum gibi, sadece en küçük değerin tamsayı katı olan değerleri alabilir. Bu etkinin açıklanması, de Broglie'nin atom yörüngelerinin

kuantize olmasının nedeni hakkındaki ilk düşüncesine başlangıç yönünden benzer. Süper iletken bir çemberde akım bir kez çemberde döndüyse, dalga fonksiyonunun döngü sayısı, kendisini besleyebilmek ve süper akımı sürdürebilmek için tamsayı olmalıdır. Manyetik akının kuantumu küçüktür, ancak bizim insan boyutlu dünyamızda ölçülemeyecek kadar küçük değildir. Baş ve orta parmağınızı kullanarak çapı yaklaşık bir inçlik bir yuvarlak yaparsanız, dünyanın manyetik alanının bu yuvarlaktan akısı yaklaşık 10 milyon kuantum birim olur.

Süper iletkenlerin teknolojik bir nimet olduğunu söylemeye ise gerek yok. Hem Farmilab hem de Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda protonları saptıran mıknatıslar, süper iletken tellerden yapılmışlardır. Bu mıknatısları geleneksel mıknatıslarla karşılaştırdığımızda, süper iletkenleri mutlak sıfırın yaklaşık 2 derece üzerinde bir sıcaklıkta elde edebiliyor olmamızın getirdiği sorun ve harcamalar, güç tüketiminde sağlanan tasarrufu karşılamayacak kadar çoktur. Süper iletkenler gelecekte manyetik yolla havaya kalkabilecek araçlarda da kullanılacaklar gibi gözüküyor.

89. Süper akışkanlık nedir?

1937 yılında Moskova'da çalışan Pyotr Kapitsa[91] ile Toronto'da çalışan John Allen ve Donald Misener, neredeyse eş zamanlı olarak sıvı helyumun 2 Kelvinin altında soğutulduğunda inanılmaz bir biçimde sürtünmesiz (teknik terimi kullanırsak ağdalılık olmadan) akış özelliği gösterdiğini keşfettiler. Bu akışa süper akışkanlık adı verildi. Araştırmacılar sonrasında aynı olgunun helyum–3 izotopunda, ancak çok daha düşük bir sıcaklıkta, bir Kelvinin binde birinin altında gerçekleştiğini tespit ettiler. Süper akışkanlık ve süper iletkenliğin ortak noktaları, her ikisinin de sürtünmesiz hareket olması ve bü-

91 Kapitsa İngiltere'deki Cambridge Üniversitesi'nde çalışmak üzere ülkesinden ayrılmıştı, ancak 1934'de ülkesini ziyareti esnasında ülkede kalmaya zorlandı; çalışması serbest ancak ülkeden ayrılması yasak olacaktı. Ernest Rutherford, Kapitsa'nın çalışmasına orada devam edebilmesi için laboratuar donanımının deniz yoluyla Moskova'ya taşınmasını sağlayan kişiydi.

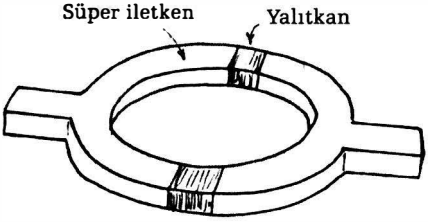
yük ölçekli dünyaya bir kuantum etkisi taşıyor olmalarıydı. Akışın bozonlar aracılığıyla çoğalması yönünden de birbirleriyle benzerlik göstermektedirler. Helyum–3 süper akışkanlığı, ihtiva ettiği bozonların fermiyon çiftlerinden oluşmasıyla süper iletkenliğe özellikle benzemektedir. Süper iletkenlikte fermiyonlar elektronlardır. Helyum–3 süper akışkanlığında ise fermiyonlar helyum–3 atomlarıdır. (Protonlar, nötronlar ve elektronları hesaba katınca, bir helyum–3 atomu beş fermiyon içermektedir ki, bu onu da bir fermiyon yapar.)

Helyum-4'teki süper akışkanlık mekanizması ise, helyum–4 atomlarının zaten hazır biçimde, çift oluşturmaksızın bozon olmalarıyla farklılık gösterir. Helyum–4 atomları, 2 Kelvinin altında sıcaklıklarda ulaşılabilir en düşük enerji durumuyla örtüşerek bir araya gelirler. Bir Bose-Einstein yoğunlaşması olan bu kümelenme, enerji transferini mekanik titreşimlere (ses dalgalarına) hapseder ve bu yolla enerji kaybına bir son verir; bir başka deyişle sürtünme ve kıvamlılığın tamamen bağlı olduğu enerjinin düzenli hareketten düzensiz harekete çevrilmesini engeller.

Süper akışkanlığın çarpıcı bir pratik uygulaması, *Gravity Probe B* (Kütleçekim Sondası B) deneyi olmuştur. Dünyanın çevresindeki uzayzamanda kolayca göze çarpmayan bükülmeye dair kanıtlar bulmaya dönük (verileri halen inceleniyor) bu deneyde, kendisini eğecek ya da yavaşlatacak tüm dış etkilerden arındırılması gereken bir jiroskop kullanıldı. Bu, jiroskopun 2 Kelvinlik bir sıcaklıktaki süper akışkan helyuma batırılmasıyla sağlandı. Aynı zamanda süper iletkenliğin oynadığı bir rol de sözkonusuydu. Jiroskop üzerindeki süper iletken bir kaplama, bize jiroskopun tam yönlenmesini gösteren bir sinyali sağladı.

90. Josephson eklemi nedir?

1962'de Cambridge Üniversitesi'nden yirmi iki yaşında mezun olmuş bir öğrenci olan Brian Josephson, elektronların bir süper iletkenden diğerine, birbirlerini ayıran ince bir yalıtım tabakasından geçerek tünellenmesi konusuna özel bir ilgi duymaktaydı. (Gerçekleştirdiği bu düzenlemeye daha sonra *Jo-*



Resim 62: Bir "SQUID", iki Josephson ekleminin bir çember oluşturacak şekilde bir araya getirilmesiyle oluşturulur. Manyetik alanların mükemmel bir kesinlikle ölçülmesini sağlar.

sephson eklemi adı verilecektir.) Dikkat çekici iki keşfe imza attı. Bunlardan birincisi; yalıtım tabakasında sıfır voltaj olsa bile bir akım gerçekleşmekteydi, bu alışık olduğumuz voltajla güdülenen zayıf bir akımın değil, gerçek bir tünelleme akımının var olduğunun göstergesiydi. Üstüne üstlük akım her iki yönde de gerçekleşebiliyor ve büyüklüğü, iki süper iletkendeki Cooper çiftlerinin dalga fonksiyonlarının ilişkisine bağlı olarak (buna *faz farkı* denmektedir), belli bir maksimuma kadar değişkenlik gösteriyordu. Bu açıkça bir büyük ölçekli kuantum etkisiydi; çünkü kuantum dalga fonksiyonlarının hareketine bağlı olmanın yanı sıra, klasik açıdan aşılamayacak bir engelin tünellenmesini de içermekteydi.

Josephson'ın ikinci keşfi daha da garipti. Eklemin üzerine sabit bir voltaj uygulanırsa, alternatif bir akım (AC)[92] doğmaktaydı. (Geleneksel malzemelerle sabit bir voltaj sadece DC adı verilen sabit, doğrudan bir akım sağlar.) Üstüne üstlük Josephson bu AC'nin frekansının, yükün kuantum birimi *e* ve Planck sabiti *h*'yi içeren basit bir sabitle uygulanan voltajın çarpılmasına eşit olduğunu tahmin etmekteydi. (*h* nerede karşımıza çıkarsa, orada kuantum fiziğinin işbaşında olduğundan emin olabilirsiniz).

Doğruluğu bir süre sonra deneyle de kanıtlanan bu görüşleri Josephson'a doktora derecesi verilmesini sağladı. Çok geçmeden 1973 yılında fizik alanında Nobel Ödülü'nü de aldı.

Şekil 62'de gösterildiği üzere iki Josephson eklemi paralel bağlandığında, bu kez başka bir göz kamaştırıcı etki görünür hale gelmektedir. Bu düzenlemenin "deliğindeki"

92 Alternating Current kelimesinin baş harfleriyle kısaltması AC, alternatif akım anlamındadır -çn.

manyetik alan sıfırsa, o zaman tek bir eklemde olduğu gibi akım indüklenir ve (bu eklemlerin özdeş olduğunu varsayarsak) yarısı bir eklemden yarısı diğer eklemden olacak şekilde gerçekleşir. Ancak bir manyetik alan (daha kesin konuşursak -yüzey çarpı alan- bir manyetik akı) deliğin içinden geçiyorsa bu kez, akının (bir önceki soruda ele aldığımız) süper iletken çember yoluyla kuantizasyonu meseleye dâhil olur. Orada akının temel kuantum biriminin tamsayı katı *olmayan* bir akı sağlanmasına dönük tüm çabalar otomatik olarak önlenecektir. Toplam akıyı kuantize bir değere taşımaya yetecek kadar fazladan küçük bir manyetik alan yaratmak üzere, fazladan küçük bir akım çember boyunca akacaktır. Süper iletken, akı kuantumunun tamsayı katı olmayan bir akıya "izin" vermeyecektir. Diyelim ki, çemberin üst tarafında soldan sağa, alt tarafında sağdan sola doğru olabilecek olan, bu fazladan küçük akımın etkisi, dalga fonksiyonlarının fazlarını üst ve alt yollarda değiştirmeye ve böylelikle de eklem çifti içerisinden geçen toplam akımı değiştirmeye yetecektir. Dolayısıyla eklemler tıpkı yapıcı veya yıkıcı girişime –bu durumda alt ve üst yolları izleyen akımlar arasında bir girişime– sebep olan bir çift yarık gibi davranabilmektedirler. Bu girişim, çembere uygulanan (ya da uygulanmaya çalışılan) manyetik akı yoluyla kontrol edilebilmektedir.

İki Josephson eklemi ile gerçekleştirilen bu düzenlemeye SQUID[93] adı verilmektedir. Pratik kullanımlarından biri, manyetik alanların daha önce ulaşılamamış bir kesinlik düzeyinde ölçümüdür. Akıdaki her bir kuantum birim değişikliğinde, kolaylıkla görülebilir bir biçimde cihazdan geçen akım yapıcı ve yıkıcı bir girişim döngüsünden geçmektedir. Yukarıda belirttiğim gibi, bir kuantum birim akı, dünyanın manyetik alanının 1 inç çapındaki bir çemberden akısından yaklaşık 10 milyon kez daha azdır.

93 SQUID: **S**uperconducting **Qu**antum **I**nterference **D**evice, süper iletken kuantum girişim cihazı anlamına gelmektedir -çn.

91. Kuantum benek nedir?

İlkokulda atom fikrinin bana ilk anlatılışı şöyleydi: Bir malzemeyi ortadan kesersiniz, sonra bu yarımları bir kez daha ortadan kesersiniz, daha küçük parçalar oluşur, bunları daha da küçük parçalara bölersiniz, bölmeye devam edersiniz, en sonundaysa artık devam edemez hale gelirsiniz, çünkü artık kesilemeyecek olan bir tekil atoma ulaşmışsınızdır. O zaman kırk, yirmi veya on atom büyüklüğünde bir parçaya eriştiğimizde bir şey değişecekse ne değişeceğini sormayı akıl edememiştim. Bu küçüklükte bir malzeme parçasına *kuantum benek* adı verilir ve hem hacimli madde hem de tekil atomlardan farklı hayli ilginç özelliklere sahiptir. Benek, diyelim ki, bir katkılı yarı iletkenden yapılmışsa, on atomluk küçüklükte de olsalar, yine valans kuşağı ve iletim kuşağı elektronlarına sahip olur. Ancak bu kuşaklar, iri madde parçalarının neredeyse süreklileşmiş enerji silsilesine sahip olmak yerine, tekil atomlardaki özel kuantize enerjilere benzer şekilde bariz biçimde farklı enerjilere sahiptirler. Dolayısıyla beneğin çapı bir atomdan beşe, ona, yüze, bir milyona doğru büyüdükçe, elektron enerjilerinin aralığı birkaç elektron volttan bir elektron voltun kesirlerine ve en sonunda da öyle küçük bir enerjiye düşer ki, enerji silsilesi sürekliymişçesine muamele görebilir hale gelir.

Beneğin boyutu büyür veya küçülürken başka bir şey daha değişime uğrar. İletim elektronları ile valans elektronları arasındaki enerji farkı değişir. Beneğin boyutu küçüldükçe, kuşaklar arasındaki fark büyür. Bu, elektronlar iletim kuşağından valans kuşağına sıçradığında yayınlanan fotonların küçük beneklerde daha fazla enerjiye sahip oldukları anlamına gelir. Belli bir benek kırmızı ışık yayıyorsa, aynı malzemeden yapılmış daha küçük bir benek yeşil ışık (daha büyük enerjili fotonlar) ve daha da küçük bir benekse mavi ışık (daha da fazla enerjiye sahip fotonlar) yayar. Bu kuantum beneklerinin (çok büyük sayıda beneğin!) seçilmiş bir renkte ışık kaynağı olarak kullanılması olasılığına kapıyı açar.

Kuantum beneklerinin bu özelliklere sahip olmaları çok da şaşırtıcı değildir ve bu yıllar önce de öngörülebilirdi. Simgeledikleri teorik bir zaferden ziyade teknolojik bir zafer niteliği

taşımaktadır. Kontrol edilebilir boyutlarda ve büyük sayılarda kuantum beneği elde etme becerisi, *nano teknoloji* olarak bilinen modern mikro uygulamalar alanının güç gösterisi alanına girmektedir.

Bu bölümdeki sorular şu ana dek evrendeki kara deliklerden birkaç atomun toplaşmasına dek geniş bir çeşitlilik gösterdi. Bölümün dengesi gereği şimdi biraz daha derine inelim.

92. Kuark-gluon plazması nedir?

Isı maddeyi ayrıştırır[94]; diğer bir deyişle onun özelliklerini ortaya çıkartır. Örneğin diyelim ki 50 Kelvin'de bir katı azot külçesini düşünün. 63 Kelvin'den biraz daha fazla ısıtılırsa, eriyecektir. Molekülleri birbirlerine tutunma katılıklarını kaybedecekler ve sıvı azot içerisinde yüzebilmeleri mümkün olacaktır. Şimdi sıvıyı 77,5 Kelvin'e dek ısıtırsanız, o zaman da kaynar. Moleküller gazın içerisinde karmaşık tarzda neredeyse serbest biçimde dolaşırken, daha fazla özgürlük kazanırlar. Gaz, iki azot atomunun birbirine bağlanarak tek bir molekülü oluşturduğu N_2 moleküllerinden oluşmaktadır. Gaz daha fazla, akkor ısı ve ötesine doğru ısıtıldığında atomlar N_2 molekülleri biçiminde birbirlerine bağlı olmaya devam ederler. Ancak sıcaklık 2000 Kelvin'i aştığında (bundan böyle sıcaklık rakamlarım yaklaşık değer taşıyacaklar), atomlar kendilerini tutamamaya başlarlar ve 50.000 Kelvin'e ulaşıldığı zaman, gaz moleküllerden değil, neredeyse tamamen azot atomlarından oluşmuş hale gelir. (Aslında yüksüz atomlardan da değil, iyonlardan (yüklü atomlardan) oluşur, çünkü bu sıcaklıkta elektronlar termal hareketin türbülansı nedeniyle atomlardaki yerlerinde tutunamaz hale gelmişlerdir.) Sıcaklık yükselmeye devam ettikçe, atomlardan önce bir, sonra iki ve en sonunda yedi elektronun hepsi serbest bırakılır. Yaklaşık 5 milyon Kelvinlik bir sıcak-

94 Bir kimyacı için *ayrıştırma*, bir molekülü atomik bileşenlerine ayırmak anlamına gelir. Ben terimi daha geniş bir manada, maddenin altında yatan parçaları ortaya çıkartmak için onu didikleme anlamında kullanıyorum.

lıkta, bir zamanlar bir katı külçe olan azotumuz, çıplak azot çekirdekleri ve elektronlardan oluşan bir plazma halini alır. (Bu arada tek bir "parçacık", bir azot molekülü olarak yola çıkmış olanın, on altı parçacığa, iki çekirdek ve on dört elektrona dönüştüğüne dikkat edelim.)

Sıcaklık daha da yukarı itilirse, bu plazma yaklaşık 50 milyar Kelvinlik bir sıcaklığa ulaşılıncaya kadar var olmaya devam eder. Ardından çekirdeğin çekirdeğe uyguladığı yoğun itip kakma, çekirdeklerin parçalara ayrılmaya başlamasına ve proton ve nötron bileşenlerinin ortaya dökülmesine neden olur. 200 milyar Kelvin civarında bu süreç tamamlanmaya yüz tutar ve proton-nötron-elektron plazmasının içerisinde her bir orijinal molekül başına şimdi etrafta hoplayıp zıplayan tam kırk iki parçacık vardır (on dört proton, on dört nötron, on dört elektron).

Aşağıya doğru yolculuğumuzun burada da kesilmeyeceğini öngörmek zor değil. Her ne kadar elektronlar parçalara ayrılması konusunda bilgi sahibi olmadığımız temel parçacıklardan olsalar da, proton ve nötronlar kuark ve gluonlar içeren bileşik parçacıklardır. Nükleonları yarıp açmak için gereken sıcaklık ne olabilir? Teorik hesaplamalar bir trilyon Kelvin'den biraz daha fazla bir sıcaklığın bu işi görmeye yeteceğini söylüyorlar; bu sıcaklıkta kuark, gluon ve elektronlardan oluşan bir çorba olan *kuark-gluon plazması* ortaya çıkıyor. Böylesi bir sıcaklığa erişilebilir mi? Bir perspektif oluşturması açısından, bildiğimiz en yüksek sıcaklık bu olsa gerek, Güneş'in merkezindeki sıcaklığı ele alalım, bu kuark-gluon sıcaklığının yüz binde biridir sadece. Yine de, en azından bir an için, böylesi bir sıcaklığa ulaşmanın bir yolu vardır. Bu yol, bir hızlandırıcıda bir yüksek enerjili çekirdeği bir başkasıyla çarpıştırmaktır. Tam olarak bu amaç için hazırlanmış bir hızlandırıcı Long Island, New York'taki Brookhaven Ulusal Laboratuarı'nda bulunmaktadır. Bu hızlandırıcı Relativistik Heavy Ion Collider (Relativistik Ağır İyon Çarpıştırıcısı) veya kısaca RHIC'tir ("*rik*" olarak okunur). Altın atomlarını yetmiş dokuz elektronunun hepsinden soyundurabilir ve çekirdeğini 20 TeV'lik bir enerjiye kadar hızlandırabilir, ardından bu enerjiyle yüklen

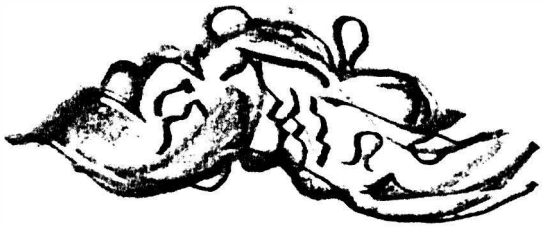
miş iki çekirdeği birbiriyle çarpıştırarak, çarpışma sonucu toplam 40 TeV'lik bir enerjiyi açığa çıkarabilir. (Bu CERN'de Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'ndaki protonlardan elde edilen enerjiden bile büyüktür. Farkın nedeni, RHIC'te hızlandırılan altın çekirdeklerinin yetmiş dokuz kat daha fazla yüke sahip olmalarıdır, bu sayede Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'ndaki hızlandırılan protonlara göre elektrik kuvvete yetmiş dokuz kat daha fazla duyarlılık sözkonusudur.)

Kuark-gluon plazması hakkında RHIC'te 2000 yılından bu yana veri toplanmaktadır ve henüz özellikleri hakkında detaylı sonuçlara varılmamıştır. Haklı olarak kuark-gluon plazmasına bildiğimiz katı, sıvı, gaz ve geleneksel plazmaya eklenmek üzere, maddenin yeni bir hali denmektedir. Onun hakkında öğrendiklerimiz, evrenin ilk anlarına bir ışık tutmuş olacak. Hesaplamalara göre bir trilyon Kelvin'in üzerinde bir sıcaklık, sadece Büyük Patlama'nın bir saniyenin milyonda biri kadar bir süre sonrasında gerçekleşmiştir. Ardından evren, kuarkların kendilerini nükleonlar içerisinde bir araya getirdikleri bir noktaya dek "soğumuştur". O andan itibaren RHIC'te yaşama geçirilmesine dek, bir daha hiçbir kuark-gluon plazmasının oluşmamış olması mümkün gözükmektedir.[95]

93. Planck uzunluğu nedir? Kuantum köpüğü nedir?

1899 yılında, henüz kuantize (öbekli) enerji değişimi fikrinin gelişiminden de önce, Almanya'da Max Planck kendisinin *b* adını verdiği (ertesi yıl *h* adını verir) bir sabit elde eder. Kovuk ışınımı denen tüm malzemelerden bağımsız bir olgunun formülüne girdiği için, bunun temel bir sabit olduğunu düşünür. Ardından bu yeni sabit b'yi doğanın sağlam başka iki temel sabitiyle, Newton'un kütleçekim sabiti *G* ve ışık hızı *c* ile birleştirirse, uzunluk boyutuna sahip bir nicelik elde edebildiğinin

95 2010 yılı itibarıyla RHIC'teki araştırmacılar 4 trilyon Kelvinlik bir sıcaklığa ulaştılar ve kuark-gluon plazmasının gazdan ziyade bir sıvı gibi davrandığına dair kimi kanıtlar buldular. Cenevre'deki CERN'deki araştırmacılar da kuark-gluon plazması üzerinde çalıştılar ve er ya da geç Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nın da daha sıcak madde parçacıklarının peşine düşmesi bekleniyor.



Şekil 63: Kuantum köpüğü. Planck ölçeğinde uzay ve zamanın nasıl görünebileceğine ilişkin hayali bir görünüm.

farkına varır. Aslına bakılırsa bu oldukça küçük bir uzunluktur (10^{-35} m'nin birkaç katıdır) ancak Planck'a cazip gelmiştir, çünkü tanımı diyelim ki metreden farklı olarak, insanın seçtiği herhangi bir karşılaştırma uzunluğuna bağlı değildir (metrenin orijinal tanımı, Ekvator'dan kutuplardan birine kadar olan uzaklığın on milyonda biridir). Fizik kuram ve deneylerinde ortaya çıkmış herhangi bir uzunluktan daha kısa olan o kadar çok büyüklük siparişi vardı ki, Planck'ın hesaplanmış uzaklık birimi, uzun yıllar boyunca bariz bir önem taşımayan bir ilginçlik olarak kaldı. Bu durum 1955'de John Wheeler genel görelilik (Einstein'ın kütleçekim kuramı) ile kuantum fiziğinin nerede bağlantı kurabileceğini araştırırken değişti.

Wheeler'ın otobiyografisine de koyduğu üzere, bir çekirdek veya tekil bir proton boyutunda, "parçacıkların beklenen coşkulu dansını izlediğimiz, kuantum dalgalanmalarının çok küçük olanların dünyasına böylesine hayat dolu bir coşkunluk kattığı" yerde, tüm bunların arenası uzay ve zaman (uzayzaman) "cam gibi pürüzsüz" kalmaktadır. Wheeler uzayzamanın da bu kuantum dansına katılacağı bir nokta olması gerektiğini düşündü. Öğrencisi Charles Misner ile tartışmalarının sonuca ulaşmasında kendisine yardımcı olduğunu da teslim eden Wheeler, bu noktanın kendisinin Planck uzunluğu adını tekrar verdiği, Planck'ın hesapladığı uzunluk boyutu olduğu sonucuna vardı (Bazı fizikçiler *Planck-Wheeler uzunluğu* adını verirler). Eğer bir Planck uzunluğu varsa, ışığın bir Planck uzunluğunu aşması için gereken zaman olan, bir Planck zamanı da vardır. Bu yaklaşık 10^{-43} saniyelik bir zamandır.

Planck'ın bu bölgesinde uzayzaman ile kuantum fiziği kucaklaşmakta, uzayzamanın "cam gibi pürüzsüzlüğü", kıvranma ve çoklu bağlanmış alanlar dâhil geometrinin dalgalanmalarına; Wheeler'ın "kuantum köpüğü" adını koyduğu şeye yerini bırakmaktadır. Şekil 63 bu durumun hayali bir temsilini göstermektedir.

Kuantum köpüğünün kendisini göstermesinin beklendiği boyut, bizim kavrayış becerimizin ötesinde bir küçüklüğe sahiptir. Planck uzunlukları bir proton boyu edene kadar yan yana dizilse ortaya çıkan sayı, Philadelphia'dan New York'a kadar uzanan bir uzaklıkta yan yana dizilmiş protonların sayısı kadardır (ancak yüz bin protonun bir atom boyu ettiğini hatırlayın). Yine de bu olağanüstü küçük Planck alanı, geleceğin önem taşıyan yeni fiziğinin keşfedileceği alandır (nükleer ölçekle Planck ölçeği arasında yeni fiziğin birçok öğesinin keşfedilmesi olasılığının üzerinden atlamaksızın söylüyoruz.)

XV. Bölüm

Sınırlar ve Bulmacalar

94. Fizikçiler neden 137 sayısını severler?

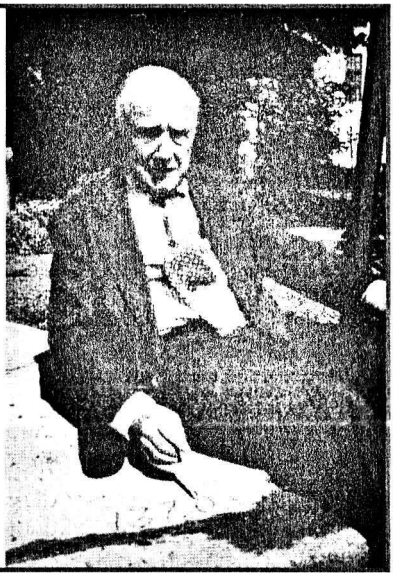
Uğraştığımız niceliklerin çoğu birimlerle ifade edilir: 6 feet, 3 mil, 2 gün, 5 pound, 40 watt. Birimi değiştirirseniz, sayıları da değiştirirsiniz. Altı feet 2 yardadır (veya 183 santim); 3 mil 4,83 km.dir; 2 gün 48 saattir; vs Ancak bazı sayılar "saf" veya ebatsız-boyutsuzdur. Bir zardaki yüzeylerin sayısı altıdır; zarın ağırlığı veya büyüklüğünü hangi birimle ölçerseniz, bu değişmez. Aynı birime sahip iki niceliğin oranı da boyutsuzdur. Teyzenizin evine uzaklığınız on dört mil, en sevdiğiniz restorana uzaklığınız iki mil ise, bu iki uzaklığın oranı 7'dir. Uzaklıkları metre, rod, feet veya furlong ölçebilirsiniz. Oran hep 7 olacaktır.

Kuantum dünyasında kullanılan niceliklerin çoğu da birimlerle ifade edilir: Atomik kütle birimi, elektron volt, nanometre ya da piko saniye... Bazı önemli sayılar boyutsuzdur. Bir müonun kütlesi örneğin elektronun kütlesinin 206.769 katıdır,

kütleyi ölçmek için hangi birimi kullanırsanız kullanın fark etmez. Boyutsuz niceliklerin özellikle büyüleyici bir birleşimi vardır. Planck sabiti bölü 2π'den başlayalım ($\hbar$, "h-bar"). Bunu ışık hızı (c) ile çarpın ve elektron yükünün (e) karesine bölün. Sonuç $\hbar c/e^2$, 137,036'ya eşit boyutsuz bir sayıdır. $\hbar$, c ve e için hangi birim setini kullanırsanız kullanın, sonuç aynı olur. Bu niceliklerin daha az bir kesinlikle bilindiği 1920'lerde, bazı fizikçiler bu rakamın *tam olarak* 137 olabileceğini düşündüler. Nerede o şans.

137,036 neden sadece ilgi çekici değil, aynı zamanda önemlidir? Çünkü tersi, $e^2/\hbar c = 1/137{,}036$ ya da yuvarlarsak 0,007 elektromanyetik etkileşimin etkinlik ölçüsüdür. Buna *bağlanma sabiti* denir; yüklü parçacıkları elektromanyetik enerjinin kuantum taşıyıcıları olan fotonlara bağlar. Bu sayı küçük olduğu için, bağlanma da bir hayli zayıf olur ve fizikçiler ışığın yayınım ve soğurma süreçlerini göreli bir kolaylıkla hesaplayabilirler. Bu ters sabit, 1/137,036 *ince yapı sabiti* olarak da bilinir. Görelilik yüzünden atomlardaki enerji düzeyleri (örneğin spin ve yörünge açısal momentumların göreli uyumuna bağlı olarak) "ayrıktır". İlk kez Niels Bohr tarafından tespit edilen enerji düzeylerinin farklılığı ile karşılaştırılınca göreli olarak küçük olan bu ayrıklık *ince yapı* olarak adlandırılmaktadır ve ince yapı sabitine bağlıdır. İnce yapı sabiti daha büyük olsaydı, ayrıklık da daha büyük olurdu. İnce yapı sabiti 1 değerini alacak kadar büyük olsaydı, o zaman atomik enerji düzeylerinde hiç ince yapı olmaz, sadece esas yapı olurdu. (Başka birçok şey de daha farklı olurdu ve biz muhtemelen bunları burada tartışabiliyor olmazdık.)

Onca sayısal değer içerisinden *neden* 137? Kimse bilmiyor. Bu fizikçilerin günün birinde yanıtını bulmayı ümit ettikleri bir soru. Bu boyutsuz sayıdan büyülenenlerden biri de John Wheeler'dı, kendisinden bu kitapta başka bağlamlarda da bahsetmiştik. 1990'ların başında bir gün, Princeton'daki Washington Caddesi'nde yeni yapılmış bir kaldırıma rast gelir. Ustabaşına tüm sevimlilik ve ikna ediciliğini kullanarak yanaşır ve adamı, henüz ıslak olan çimentoya bir sayı yazmasına izin verilirse eğer, tarih ve bilimin buna müteşekkir olacağına bir



John Wheeler (1911–2008). Wheeler'da bir miktar afacanlık vardı. İşaret ettiği çimento yazısını çok severdi.

şekilde ikna eder. Washington Caddesi ile Ivy Sokağı'nın köşesindeki kaldırımda halen 137,036 yazılı durmaktadır. Fotoğrafta Wheeler 1994 yılında el emeğine işaret ederken görülüyor.

Hakkında bilgi sahibi olduğumuz parçacıkların hepsi ya elektrik yüklüdür ya da yüksüzdürler. Dolayısıyla elektromanyetik alanlarla (fotonlarla) ya zayıf bağlanırlar ya da hiç bağlanmazlar. Ancak parçacıkların farklı bir sınıfı da teorik olarak mümkündür: manyetik yük ya da "kutup şiddeti" taşıyan parçacıklar. Tek-kutuplular denen bu parçacıklar ilk kez 1931 yılında İngiltere'de Paul Dirac tarafından araştırılırlar. Bu parçacıkların manyetizmanın doğrudan kaynağı olma niteliği taşımaları gerekirdi. Elektrik yüklü parçacıklar manyetizmanın dolaylı kaynağı niteliği taşırlar; yarattıkları manyetik etkiler hareket etmeleri yoluyla olur, sadece "orada olmaları" sayesinde değil. Dirac'ın çarpıcı keşfi, (eğer varlarsa) tek-kutupluların fotonlarla (elektron ve protonlara göre) çok daha kuvvetli biçimde bağlanacaklarıydı. Manyetik bağlanma sabiti 1/137 değil, 137 olacaktı. Yıllar boyunca tek-kutupluların bulunması

amacıyla çok sayıda deneysel araştırma yapıldı (bunlardan birine ben de 1963'te katıldım), ancak henüz herhangi bir şey bulunabilmiş değil.

Yeğin etkileşen kutupların varlığı, klasik fizikte herhangi bir kuramsal sorun yaratmaz. Birbirlerini elektronlara göre neredeyse yirmi bin kat daha fazla bir biçimde çeken ve iten parçacıklar denir, geçilir. Ancak kuantum fiziğinde etkileşimler büyük olduğunda yeni şeyler olduğu için problem yaratır. Bir etkileşimin ne kadar zayıf olabileceğine dair bilinen bir alt sınır yoktur, ancak ne kadar kuvvetli olabileceğine dair bir üst sınır olabilir. Epeydir kuramcıların manyetik etkileşim için bu tip bir üst sınır bulmalarını ve böylelikle 137 sayısının varlık *gerekçesini* tespit edebilmemizin umudunu besliyorum. Belki de manyetik bağlanma sabiti 137,036 bu kadar büyük olduğu için, elektrik bağlanma sabiti 1/137,036 bu kadar zayıftır.

95. Dolanıklık nedir?

Dolanıklık üzerine kitaplar yazılabilir (ve yazılmıştır)[96]. Temel fikir basittir, ancak bizden talep edilen sorgulama eksikliği büyüktür. Dolanıklık, üst üste binmenin özel bir çeşididir; üst üste binmiş durumların kuantum etkilerinin normal mesafelerinin çok ötesindeki büyük uzaklıklara yayılabilmesini içerir. Herhangi bir kuantum durumu, iki veya daha fazla durumun üst üste binmesi olarak ifade edilebilir. Soru 76'da tartıştığımız üzere örneğin spini kuzeyi işaret eden bir elektron, aynı zamanda spini doğu ve batıyı gösteren durumların bir üst üste binmesidir. Hidrojen atomunun taban durumundaki bir elektron aynı zamanda, her biri elektronu belli bir yerle sınırlı tutmuş sayısız durumun üst üste binmiş halidir. Bu tip üst üste binmeler havsalayı zorlasalar da, bizlere dolanıklık olarak bilinen üst üste binme çeşidi kadar akıl dışı gelemezler.

Örneğin belli bir noktada bir çift fotona bozunan, hareketsiz bir yüksüz pionu düşünelim. İlk pionun sıfır yükü, sıfır momentumu ve sıfır açısal momentumu (spini) vardır. Bunlar

96 Örneğin *bkz.* Louisa Gilder, *The Age of Entanglement: When Quantum Physics Was Reborn* (New York: Knopf, 2008) ve Amir Aczel, *Entanglement* (New York: Penguin, 2003)

korunan nicelikler oldukları için, değerleri bozunum ürünlerinde de yine sıfır olur. İki fotonun yükleri sıfırdır. Bu yük korunumunun icabına bakılmasını sağlar. Sırt sırta uçuşurlarken momentumları eşittir. Bu momentum korunumunu sağlar, çünkü zıt yönlü iki eşit vektörün vektör toplamı sıfır olur. Spin yönlerinin, toplamda sıfır spini korumak için, zıt olması gerekir. Ancak uçuşarak ayrılan iki foton, gözlemlenene dek, tek bir sistemdir: zıt yönlü momentumlara ve zıt yönlü spinlere sahip bir üst üste binmedir. Bir fotonun sola, diğerinin sağa doğru uçuşa geçtiğini varsayalım. Sola giden fotonun spini sola yönlenebilir, bu durumda sağa giden fotonun spininin sağa yönlenmesi gerekir. Bu durum için kısaca [L,R] diyelim. Veya sola giden fotonun spini sağa yönlenirse, sağa giden fotonun spini sola yönlenmek zorundadır. Bu duruma da [R,L] diyebiliriz. Bozunum sürecinde yaratılan gerçek durum, (seçili bu uçuş yönleri için) bu iki olasılığın eşit karışımıdır (üst üste binmesidir). Bu durum [L,R] – [R,L] olarak yazılabilir.[97] Bu, eğer sola giden fotonun spinini ölçerseniz, sola veya sağa yönlenmiş bulma şansınızın eşit olduğu anlamına gelir.

Einstein'ın "uzaktan hayaletsel eylem" adını verdiği şey işte burada görülüyor. Bu sola giden fotonun spinini, foton yaratıldığı yerden bir metre, bir mil veya bir ışık yılı uzaktayken ölçebilirsiniz. Ölçümü yaptığınız anda, diğer (iki metre, iki mil veya iki ışık yılı uzaktaki) fotonun spin yönünün ne olmak zorunda olduğu sonucuna varabilirsiniz. Ölçüm yapılana dek her iki fotonun spin yönleri belirsiz ve bilinmez iken bile, bir fotonun spin yönünü kesin biçimde öğrenmek, aynı anda diğer fotonun spin yönünü belirlemektedir. Bunun nedeni, iki fotonun iki ayrı kuantum sistemini değil, ölçüm anına dek tek bir kuantum sistemini oluşturuyor olmalarıdır.

1935 yılında, Almanya'dan bir göçmen olarak Birleşik Devletler'e ayak bastıktan iki yıl sonra Albert Einstein Princeton'daki İleri Araştırmalar Enstitüsü'ndeki iki çalışma arkadaşı, Boris Podolsky ve Nathan Rosen ile birlikte çalışmanın

97 Eksi işareti için tartışma ölçeğimizi aşan, incelikli bir neden sözkonusudur. Esas önem taşıyan, iki olasılığın eşit olasılığa sahip olmasıdır.

amacı kuantum fiziğini geliştirmek değil, sorgulamak olmasına karşın, kuantum fiziği hakkında şimdiye kadar yazılmış en ünlü çalışmalardan birini yayınladı. Çalışmanın amacının neredeyse, az önce belirttiğim gibi bir sistemin bir parçasının, sistemin uzaktaki ve tamamen bağlantısız görünen diğer parçası üzerinde bir ölçüm yapıldığında bunu dikkate alması gibi bir gerekçeyi kabul edebilen birinin akıl sağlığını sorgulamak olduğu söylenebilir. EPR (yazarların baş harf kısaltmaları sonrasında herkesçe kabul gördü) üzerine eğildikleri durumu şu biçimde betimliyorlardı: İki sistem bir araya geliyor, etkileşiyor ve sonrasında birbirlerinden ayrılıyorlar. Kuantum fiziğine göre iki sistem etkileşimleri yüzünden *dolanık* hale geliyorlardı (bu terim Erwin Schrödinger tarafından EPR çalışmasından hemen sonra ortaya atıldı) ve onları dolanıklıktan kurtaracak bir ölçüm yapılana dek, gerçekte (ne kadar uzağa yayılmış olurlarsa olsunlar) *tek bir* sistemdiler. Üst üste binmiş genlikleri ve göreli olasılıkları ile aynı sınırlı uzayı işgal etmeye devam ettikleri durumdan farksız bir haldeydiler. EPR bir sistemin metreler, miller veya ışık yılları uzaklığındaki başka bir sistem üzerinde yapılmış bir ölçüme anında reaksiyon göstermesi fikrinin anlamsız olduğu, dolayısıyla yanlış olması gerektiğini düşünmekteydiler. Üst üste binme fikrinin genişletilerek kendi düşüncelerine göre saçma bir sınıra taşınması yoluyla EPR kuantum fiziğinde bir hata (veya en azından fizikçilerin kuramı tanımlama biçimlerinde bir hata) bulduklarını düşünmekteydiler.

Bir yerde yapılan bir ölçümün başka yerdeki bir şey hakkında bir bilgiyi ortaya çıkarması, kendi içinde o kadar acayip bir fikir değildir. Joe ile kız kardeşi Mary'nin seyahate çıktığını varsayalım; biri Tokyo'ya diğeri Paris'e gitmiştir, ancak hangisi nereye gitmiştir, bilmiyorsunuz. Tokyo'da Joe'yla karşılaşırsanız, Mary'nin Paris'te olduğunu derhal anlarsınız. Bunda tuhaf bir şey yok. Ancak bir kuantum fizikçisi Tokyo'da olanın Mary ve Joe'nun bir üst üste binmesi veya karışımı olduğunu ve sokaktaki karşılaşmanızın, yani sizin "ölçümünüzün" Joe'nun orada olmasını ve Mary'nin Paris'te açığa çıkmasını sağladığını, ve hatta Mary'ye Tokyo'da rastlayıp buradan

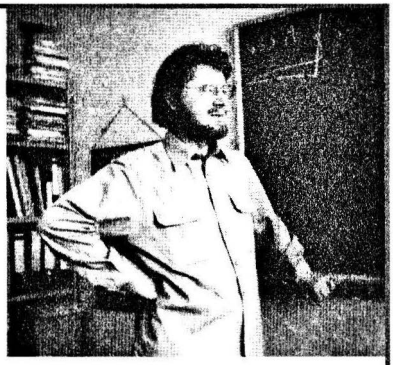
Joe'nun Paris'te olduğunu öğrenmenizin eşit derecede mümkün olduğunu söylerse, sizin buna "bu absürt" demeniz anlaşılır olacaktır. Absürt olabilir. Akıldışı da gelebilir. Ancak kuantum diyarında doğrudur.

Dolanıklık kuantum fiziğindeki sağduyuyla çelişen tek şey değildir. Ancak yirminci yüzyılın sıradışı fizikçilerinin çoğu için en çok rahatsız edici olmuş, en ışıltılı konulardan birisidir. Geçtiğimiz on yıllar içerisinde dünyanın çeşitli köşelerinde yapılmış olan birçok deney, kuantum fiziğinin dolanık sistemlerin davranışı hakkındaki beklentilerini doğrulamıştır. Bir yerde yapılan bir ölçüm gerçekten başka bir yerdeki sonucu belirlemektedir. Kısacası, kuantum fiziğinin tüm öngörülerinin, test edildiklerinde, bizim "sağduyumuzu" tatmin edip etmemelerinden ya da mantığımıza aykırı gelip gelmemelerinden bağımsız olarak doğru oldukları görülmüştür.

96. Bell eşitsizliği nedir?

1960'lı yıllarda henüz otuzlu yaşlarında olan İrlandalı kuramsal fizikçi John Bell Cenevre'deki CERN'de çalışmaktaydı. Asıl işi deneysel fizikçilerle birlikte çalışarak laboratuardaki hızlandırıcılardaki deneylerin planlanması ve yorumlanmasıydı, ancak ilk aşkı temel kuantum kuramına adayabileceği zamanı da bulabiliyordu. Kalbinin derinliklerinde, kuantum kuramından *hoşlanmıyordu*. Olasılığın temel olması ve en çok da dolanıklık fikrine karşı Einstein, Podolsky ve Rosen'la aynı hoşnutsuzluğu paylaşıyordu. Yine de kafasında kuantum kuramının her zaman deneylerin sonuçlarını kesin olarak öngörebileceğine dönük (şimdiye dek ortaya çıkan sonuçlara göre doğru olan) bir inanca sahipti.

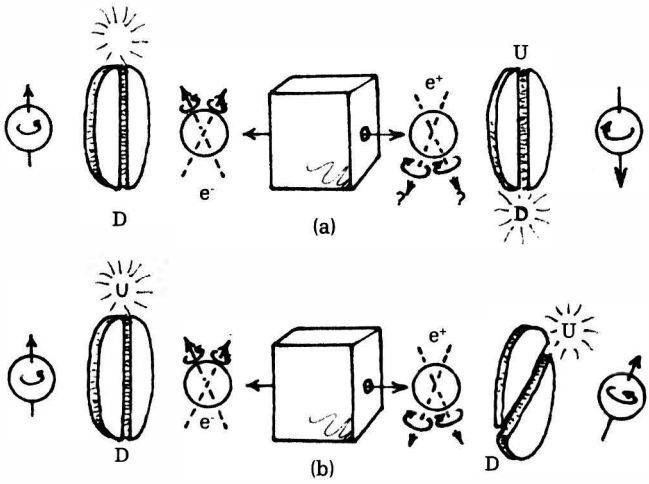
1935 yılındaki basımından neredeyse otuz yıl sonrasına dek EPR çalışması ününü korumasına karşın özel olarak etkili olmadı. Henüz kimse aynı orijinden çıkmış bir çift parçacığın dolanık olup olmadığına dair deneysel olarak karar vermenin bir yolunu düşünebilmiş değildi. Nihayet 1964 yılında Bell, sadece ünlü değil aynı zamanda etkili olmaya yazgılı kısa çalışmasını yayınladı. Çalışmasında Bell dolanıklığın gerçekliğinin deneysel yolla sınanabileceğini gösteriyordu.



John Bell (1928–1990). Belfast'ta fakir bir İrlandalı Protestan ailede yetişmiş olan Bell, ailesinde lise eğitimine kadar ilerlemiş olan tek kişiydi. Gençken ilk aşkı olan felsefeden büyülenmiş ve fiziğin "ikinci en iyi şey" olduğuna karar vermişti. On altı yaşında liseden mezun olduktan sonra, üniversiteye girecek yaşa ulaşana dek bir yıl çalışmak durumunda kalmış ve bulduğu iş yerel Queen's Üniversitesi'nde laboratuar asistanlığı olunca "Üniversite eğitiminde ilk yılımı laboratuarı temizleyip öğrenciler için kabloları ayarlamakla geçirmiş oldum" demişti. Zaman içerisinde kuantum fiziğinde yirminci yüzyılın en derin düşünürlerinden biri haline geldi.

Fikir (bu amaç vesilesiyle deneysel fizikçi gömleğini giyeceğim) basit bir örnekle resmedilebilir. Laboratuarda, Şekil 64'de gösterildiği gibi, bir elektron ve bir pozitronun yaratılmasını ve birbirlerinden sırt sırta toplam sıfır açısal momentumla (bir diğer deyişle spinleri birbirini götürecek şekilde) uzaklaşmalarını sağlayacağım. Belli bir uzaklığa kavuştuklarında yerleştirdiğim algılayıcıların spinin "yukarı" mı yoksa "aşağı" mı olduğunu tespit etmelerini sağlayacağım. Önce şeklin (a) bölümünde gösterildiği gibi, algılayıcıları özdeş şekilde, yukarı-aşağı yönlerinin laboratuardaki dikey yönle uyuşacağı şekilde ayarlayacağım. Kuantum mekaniğine göre, parçacık çifti dolanık durumdadır ve bu yukarı-aşağı ve aşağı-yukarı spinlerin üst üste binmesi olarak ifade edilir. Bu 2. algılayıcı "aşağıyı" kaydederken 1. algılayıcının "yukarıyı" kaydetmesinin yüzde 50 olasılığa sahip olduğu ve tersinin de yüzde 50 olasılığa sahip olduğu anlamına gelir. Algılayıcıların yukarı-yukarı veya aşağı-aşağı sonucu vermesi olasılığı sıfırdır. Yukarı-yukarı korelasyonu sıfırdır. Bu iki algılayıcıda bir "yukarı" sonucunun asla bir "yukarı" sonucuyla eşleşmeyeceği anlamına gelir.

EPR'nin tarafını seçer ve parçacıkların ayrıldıklarından bu yana kesin belirli spinlere sahip olduklarına inanırsanız, bu



Şekil 64: Toplam açısal momentumu (spini) sıfır olan, sırt sırta vermiş elektron ve pozitron. (a) Dedektörler spini bir "yukarı-aşağı" eksen boyunca kaydedecek şekilde yerleştirilmişlerdir. Soldaki dedektör "yukarı" işareti verirse, sağdaki dedektör "aşağı" işareti vermesi kesindir. (b) Sağdaki dedektör küçük bir açıyla yana çevrilir. Soldaki dedektör "yukarı" işareti verirse, sağdaki dedektör de (küçük bir olasılıkla) "yukarı" işareti verebilir.

sonuçlardan rahatsız olmanız gerekmez. Spin (yatay düzlemin üstünde herhangi bir yere işaret edecek şekilde) yukarıya doğru bir açıya sahip olduğunda, bir algılayıcı tarafından "yukarı" yöne doğru çevrildiğini ve aşağıya doğru bir açıya sahip olduğunda da bir algılayıcı tarafından "aşağı" yöne doğru çevrildiğini varsaymakta özgürsünüz. Spinlerin tüm yönlerde rasgele yönlenmesini beklediğiniz için, yukarı-aşağı ve aşağı-yukarı sonuçlarının yarı yarıya gerçekleşmesi ve yukarı-yukarı ve aşağı-aşağı sonuçlarının gerçekleşmemesi sizi şaşırtmaz.

Şimdi deney kurulumunu, şeklin (b) kısmında gösterildiği gibi 2. algılayıcıyı küçük bir açı değişikliğine uğratarak değiştireceğim. Bu düzenleme sonrasında, hem kuantum mekaniğinin (dolanık spinler) hem de EPR yandaşlarının (algılamanın öncesinde belirlenmiş spinler) yaklaşımından bakıldığında, algılayıcıda rastlantısal biçimde yukarı-yukarı ve aşağı-aşağı sonuçları elde edilmesi gerekir. Kuantum fizikçisinin açık-

lamasına göre, 1. algılayıcı tarafından elektronun spininin yukarı doğru olduğu bulununca, pozitronun spininin dikey açıdan aşağı doğru olması gerekir ve bu sağdaki yeni "aşağı" ve yeni "yukarı" yönlerin (yeni "aşağı"dan çok miktarda, yeni "yukarı"dan az miktarda) üst üste binmesidir. EPR yandaşlarının açıklamasına göre, spini biraz daha fazla yukarı doğru açılanmış olan ve böylece 1. algılayıcıda bir "yukarı" sonucunun okunmasını tetikleyen rastlantısal elektrona denk düşen pozitronun spini biraz daha aşağı doğru, ancak 2. algılayıcının dönme açısından daha az bir açı kazanmış olacak; dolayısıyla o da "yukarı" yönde bir sonuç okuması yapacaktır. Her iki yorumda da artık küçük, ancak artık sıfır olmayan bir yukarı-yukarı korelasyonu vardır.

Şimdi John Bell devreye girsin. EPR'nin ölçüm öncesi belirlenmiş spin anlayışına göre, 2. algılayıcının küçük açısını iki katına çıkarmanın, yukarı-yukarı korelasyonunu olsa olsa iki katına çıkarabileceğini göstermeyi başarmıştır. Bu dikkate değer bir sonuçtur, çünkü spinlerin bir algılayıcı ile karşılaştıklarında nasıl çevrileceklerine dair "bilgilendirilmeleri" için hangi yasaya başvurulacağına bağlı değildir. Bu şu şekilde yazılabilecek bir *eşitsizlik*tir[98]: İki kat açı için yukarı-yukarı korelasyonu, orijinal açının yukarı-yukarı korelasyonuna eşit veya ondan daha küçüktür. Buna karşın kuantum mekaniğinin açı ikiye katlandığında yukarı-yukarı korelasyonunun nasıl değiştiğine dair söyledikleri özgünlük taşır: Açıların çoğu için korelasyon iki katından çok artar ve çok küçük açılar için dört kat artar. Bu yüzden kuantum mekaniğinin Bell eşitsizliğini "çiğnediği" söylenir, çünkü korelasyonun dört katına kadar artmasını öngörmektedir, öte yandan EPR'nin önceden sabitlenmiş spin anlayışı korelasyonun en fazla ikiye katlanmasını öngörür.

98 Bu eşitsizliğe bir örnektir sadece ve Bell'in sunduğu orijinal örnek de değildir. 1965 yılındaki çalışmasından bu yana konuyla ilgili başka eşitsizlikler de çıkarsanmıştır ve tümü topluca *Bell eşitsizlikleri* olarak adlandırılırlar.

Kuantum dört katına çıkarma nerden kaynaklanıyor? Temelde, kuantum mekaniğin genliklerle uğraşmasından ve olasılıkların genliklerin karesiyle orantılı olmasından kaynaklanıyor. Dolayısıyla bir genlik bu örnekte olduğu gibi iki katına çıktığında, olasılık dört katına çıkıyor.

Bell eşitsizliklerinin (dipnotta belirtildiği gibi birden çok eşitsizlik var) geçerliliğini sınamak kolay bir iş değil. Böylesi deneyler zamanın mükemmel biçimde ölçüldüğü incelikli kurulumları şart kılıyor. Bu tip deneylerin ilki 1970'lerde gerçekleştirildi ve günümüze dek de Viyana, Paris, Cenevre ve diğer yerlerde devam etti. Bu tarihe dek hepsi dolanık durumlar için Bell'in tahminine uygun biçimde eşitsizliklerin ihlal edildiğini gösteren ve kuantum mekaniğinin öngörülerinin doğruluğunu kanıtlayan sonuçlara ulaştılar. Şekil 64'teki elektron ve pozitron birbirlerinden uzağa uçuşmalarına karşın, birbirlerinden kopmuyorlar.

97. Kubit nedir? Kuantum hesaplama nedir?

Bir bit[99], *klasik* bilginin temel bir parçasıdır: Bir evet ya da hayır, bir sıfır veya bir, bir yukarı veya aşağı, bir kapalı veya açık.[100] Bir kubit ise, *kuantum* bilginin temel parçasıdır. Ancak

99 *Bit* kavramı Princeton'lu istatistikçi John Tukey tarafından ortaya atılmıştır. Tukey fizik hakkında geniş bilgiye sahip oldukça hoş bir insandı. Princeton'da kurulmasına yardımcı olduğu bir halk dansları grubuna dâhil olmaktan keyif almıştım.

100 Bugünlerde daha çok baytlardan bahsediyoruz. Bir bayt 8 bitlik bir dizidir. Bir bit sadece iki olasılığı ayırt edebilir. Bir bayt 256 olasılığı ayırt edebilir, bu büyük/küçük harfleri, rakamları ve muhtelif sembolleri kodlamaya yeter. 1951 ve 1952 yıllarında iki odayı kaplayan ve toplam depolama kapasitesi yaklaşık 2 kilobayt (2×10^3 bayt) olan bir bilgisayar kullandım. Bu odalara bugün rahatlıkla her birinin elektronik depolaması birer terabayt (10^{12} bayt) olan iki yüz bilgisayar sığar. Bu çok önceki bilgisayarda depolanan her bir bayt için bugün 100 milyar bayt olurdu. Dünyada bugün depolanan baytların toplam sayısı akıl almaz büyüklüktedir ve hızla artmaktadır. 2010 yılında tüm insanlığın beyin nöronlarının toplam sayısını aşmış olabilir. Elde taşınabilir tipik bir cihazda depolanan veri baytlarının sayısı, bugün bundan altmış yıl önce dünya çapında depolanan toplam bayt sayısını geçmiş durumda.

bu iki çeşit "bit" birbirinden oldukça farklıdır. Klasik bir bit, kuzey-güney yönünde bir caddede araba sürme seçeneklerine benzetilebilir. Kuzey yönünde sürebilirsiniz veya güney yönünde sürebilirsiniz. Sadece iki olasılık vardır. İkisinin arasında bir şey yoktur. Kubit ise geniş bir asfalt alanda araba sürme seçeneklerine benzetilebilir. Tüm yönler sizin için kullanışlıdır. Hatta daha da kötüsü; aslında alanda aynı anda iki zıt yönde de gidebilme seçeneği de sözkonusudur. Elektron spini buna örnektir. Yukarıyı veya aşağıyı işaret edecek şekilde ölçülebilir. Sadece iki olasılık vardır. Sonrasında klasik bir bit gibi hareket eder. Ancak ölçülmeden *önce*, herhangi bir göreli karışımla, yukarı ve aşağı yönlerin üst üste binme durumunda var olabilir. Yüzde 50 yukarı ve yüzde 50 aşağı veya yüzde 31 yukarı ve yüzde 69 aşağı veya yüzde 91 yukarı ve yüzde 9 aşağı olabilir.

Kubitin bu dikkat çekici özelliği (farklı durumların üst üste binmesi olarak var olma becerisi), halen pratik gerçekleştiriminden uzak olduğumuz heyecan verici bir olasılık olan kuantum hesaplamaya duyulan ilginin son on yıllar içerisinde giderek artmasına yol açtı. Sıradan bilgisayarların kalbinde "mantık kapıları", bitleri işlemden geçiren devre elemanları yatar. Örneğin bir mantık kapısı, iki bitin içini neyle beslediğine bağlı olan bir çıktı biti sağlayabilir veya tek bir bitin içini neyle beslediğine bağlı olan bir açma-kapama düğmesi işlevi görebilir. Bir kuantum mantık kapısı, *hem* yukarı ve *hem de* aşağıyı veya hem sıfır hem de biri aynı anda işlemden geçirebilecek bitlere sahiptir. Bu kabiliyet, eğer birden çok kubit üst üste binmiş ise, işlem gücünde iki katlık bir artıştan çok daha fazlasına olanak sağlar. İki kubit dört biçimde karıştırılabilir, on tanesi bin biçimde, yirmi tanesiyse bir milyon biçimde. İlke olarak bir kuantum mantık kapısı tüm olasılıkları bir kerede hesaplayabilir –*tek şart* bunu sistemi etkilemeden yapmasıdır, çünkü bir etki çoklu olasılıklardan birini eksiltecek bir ölçüme denk düşer. Bir kuantum hesaplama kuramcısı, üst üste binmiş bir sistemin hayatını işlemciden nasıl kurtararak daha sonra analiz edilmek üzere diğer tarafta belirebileceği üzerine kafa yormak zorundadır.

Bilginin er veya geç kuantum bilgisayardan çekilip alınması zorunlu olacaktır. Üst üste binmiş durumlar rahatsız edilmeden bilgisayar içerisindeki aylaklıklarını ilelebet sürdüremezler. Bu bilgi alındığında, üst üste binme gerçekten bozulmuş olacak ve tüm olasılıklar içerisinden bir tekil sonuç gerçekleşmiş olacaktır. Bu ihtiyaç kuantum bilgisayarın faydalılığını ortadan kaldırmaz, çünkü genellikle sadece tek bir cevap istenir. Her ne kadar sonuca ulaşmak için çok büyük bir hesap yükü gerekebiliyor olsa da, "Bu muazzam sayı asal mıdır?" veya "Yarın Vail'de kar yağacak mı?" gibi sorular evet veya hayırla yanıtlanabilir.

Klasik bir bit, bir parça kâğıda yazılan bir sıfır veya birden daha fazlasıdır. Pratikte faydalı olması için, bir fiziksel cihazda gerçekleşmesi gerekir. Bu örneğin optik bir fiberde aşağı akan bir ışık titreşimi veya bir sabit diskteki manyetize malzeme zerresi olabilir. Benzer şekilde eğer kuantum bilgisayarlar gerçekleşirlerse, kubitlerin fiziksel "şeyler" halini alması gerekir. Kuantum hesaplamanın şu anki alt aşamasında, bu şeylerin ne olabileceğine dair sayısız olasılık sözkonusudur. Tahminler içerisinde Josephson eklemleri de var (Soru 90), kuantum benekler de (Soru 91), hatta tekil atom çekirdekleri de. İleride alanın daralacağına dair kuşku yok; yıllar önce klasik bitlerde de böyle oldu. Kartların içerisindeki delikler, katot ışını tüplerinin yüzlerindeki spotlar ve gaz dolu tüplerdeki ses darbelerinden bugünlere geldik.

98. Higgs parçacığı nedir? Neden önemlidir?

Satyendra Nath Bose ve Enrico Fermi parçacıkların kendi adlarından yola çıkılarak sınıflandırılması ayrıcalığına sahipler (bozonlar ve fermiyonlar). Ancak sadece Peter Higgs, Edinburg Üniversitesi'nden bir onursal fizik profesörü, adını özgün bir temel parçacıkla[101] paylaşmış durumda; o parçacık ki bu satır-

101 "Higgs güler yüzlü bir biçimde bir "bozon yaşamı" sürdüğünü söylemiş ve yazmıştır. Adını taşıyan parçacığın "tanrı parçacığı" olarak nitelenmesi hakkında ne hissetmektedir, onu bilmiyorum." Bu cümle Leon Lederman'ın aynı adlı kitabından alınmadır[(*The God Particle: If the Universe is the Answer, What Is the Question?* Dick Teresi ile

lar yazılana dek henüz keşfedilmiş değil. 1960'ların başında parçacık kuramcıları, eğer kuramları doğruysa doğada sıfır yüke, sıfır spine ve sıfır kütleye sahip bir bozonun var olması gerektiği tahmininde birleşmişlerdi. Böyle bir parçacığın varlığı tespit edilmiş değildi. Eğer beklendiği gibi varsa ve diğer maddelerle etkileşim içerisindeyse, belirlenmeden kalmış olması çok zordu. 1964 yılında Higgs, bu var olması beklenen ancak gözlemlenmemiş parçacık muammasından kurtulmanın bir yolunu buldu. Göreli parçacık kuramı (alan kuramı) matematiği içerisinde deyim yerindeyse bir boşluğun ya da açığın varlığını keşfetti. Bugün *Higgs mekanizması* denen bu boşluk, bu parçacığın sıfıra eşit olmayan (hatta belki de parçacık standartları açısından oldukça büyük) bir kütleye sahip olmasına izin veriyor, üstüne üstlük bunu gerekli kılıyordu. Bu yüzden Higgs parçacığı (ya da zamanla dendiği üzere kısaca Higgs) ortaya çıkıyordu. İlk öngörüldüğü üzere, Higgs yükü ve spini olmayan[102] bir bozondu, ancak kütlesi yüzlerce GeV'a çıkabiliyordu.

Pek fazla zaman geçmeden Higgs'e yeni görevler yüklenmeye başladı. 1970'lerin başında kuramcılar Higgs parçacığının altındaki alanın[103] sadece Higgs parçacığının kendi kütlesinin değil, birçok parçacığın kütle yükünü taşıdığı sonucuna vardılar. Tüm uzayı dolduran Higgs alanının, parçacıklara engel olan ve onlara kütle veren bir çeşit viskozite sağladığı düşünülmekteydi. Bu elbette aşırı basitleştirilmiş bir ifade, çünkü kütle sahibi *olan* parçacıkların hiçbiri bir diğeriyle *aynı* kütleye sahip değil ve kütlelerinin ne olması gerektiğini öngören bir kuram da kesinlikle yok. Yine de en azından özgün bir gariplik

birlikte (New York: Dell, 1993)]. Söylentiye göre kendisi de ünlü bir parçacık fizikçisi olan Lederman, Higgs parçacığına bulunması için gösterilen tüm çabaları boşa çıkardığı için "kahrolası (*goddamned*) parçacık" demek istemiş, ancak yayıncısı kamu beğenisini gözeterek bunu "Tanrı (God) parçacığı" olarak değiştirmiştir.

102 Spini sıfır olduğu için bozon olması gerekir.

103 Bu kitapta alanlar üzerinde değil, parçacıklar üzerinde yoğunlaştım. Ancak aslında ikisi beraber ve bağlantılıdır. Örneğin foton elektromanyetik alanla ilişkili parçacıktır; graviton da kütleçekim alanı ile ilişkili parçacıktır.

Higgs'te kendi açıklamasına kavuşuyor. Bu da elektromanyetik ve zayıf etkileşimler için kuvvet taşıyıcılarının kütlelerindeki büyük eşitsizlik. Soru 16'da tartışıldığı üzere kuram, çok farklı güçlere sahip olan bu iki etkileşimi tek bir elektrozayıf etkileşimde birleştirdi; ancak bu birleşme bir kuvvet taşıyıcısının, fotonun kütlesiz, iki kuvvet taşıyıcısının, W ve Z parçacıklarının da dev kütlelere sahip olması gerektiğini öngördü. Kuramcılar Higgs alanının sadece W ve Z parçacıklarına kütle veren "viskozite"yi değil, aynı zamanda bu parçacıklarla kütlesiz fotonu birleştiren "çimento"yu da sağlayacağı umudunu taşıyorlar.

Bilimciler yıllardır Higgs parçacığını araştırıyorlar ve Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nın, hatta belki de Fermilab'ın Tevatron'unun yardımıyla bu kez tespit etme konusunda iyimser olmaya başladılar. Varlığı konusunda kuşku duyan pek az kimse var. Higgs, standart model olarak bilinen devasa yapıdaki tek eksik tuğla olarak görülüyor. Bulunduğunda spini olmayan tek temel parçacık tespit edilmiş olacak. Hakkında bilmediğimiz neredeyse tek şey kütlesi. En iyi tahminle, kütlesinin W ve Z parçacıklarının kütlesinin yaklaşık iki katı veya protonun kütlesinin 100–150 katı olması bekleniyor.[104] Ve bu onu tahrik edici biçimde Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nın[105] kapsama alanına sokuyor.

99. Sicim kuramı nedir?

Kitabın bu son bölümünde ele alınan konuların çoğunda olduğu gibi, sicim kuramı da konunun uzmanı olmayanlara anlatımı hedefleyen çok sayıda kitaba konu olmuştur.[106] Burada

---

104 2012 yılında CERN'de ATLAS ve CMS deneyleri Higgs'in kütlesini 125 GeV olarak ölçtüler -yn.

105 Kuramsal fizikçiler yeni durumlara uyum sağlayan esnek bir gruptur. Eğer Higgs parçacığının şimdi beklenenden çok daha farklı bir kütleye sahip olduğu ortaya çıkarsa, eminim buna hızlıca iyi bir neden bulunacaktır.

106 Bunlardan iki tanesi, her ikisi de Brian Greene tarafından (ve her ikisi de burada kendisine yer bulamayan uzun alt başlıklara sahip şekilde) kaleme alınan *The Elegant Universe* (New York: Vintage Bo-

sadece, anlaşılması oldukça zor olan bu kuramın kimi temel özelliklerine değineceğim.

Aristo doğanın boşluğa karşıt olduğunu söylemişti. Modern fizikçiler de tekillikleri, diğer bir deyişle, uzayda yer tutmayan ve zamanda yayılmayan şey ve olayları sevmezler. Yine de kuantum fiziğinde tekilliklere yer vardır. Elektron ve diğer temel parçacıkların mekânsal uzama sahip olmadığı ve parçacıklar arasındaki etkileşimlerin uzayda belli noktalarda ve zamanda belli anlarda gerçekleştiği varsayılır.[107] Günümüz fizikçileri içerisinde yer alan cüretkâr bir grup bu konu üzerine yoğunlaşmıştır. Tekilliklerden tiksinmek yerine onlardan kurtulmaya çalışmaktadırlar. Kuantum fiziğini (ve kütleçekimi) genişleterek ulaştıkları *sicim kuramına* göre, parçacıklar noktalarda var olmazlar. Parçacık dediğimiz şeyler, aslında iki ucunda ilmekler veya çizgiler olan küçük titreşen sicimlerdirler. Sicimler akıl almaz küçüklüktedir, titreşim hızları ise akıl almaz büyüklüktedir. Deney yapılması mümkün olabilecek alanın çok çok daha aşağısında, bir diğer deyişle uzay ve zamanın Planck ölçeğinde (Soru 93'e *bkz.*) veya bunun fazla üstünde olmayan bir alanda var olurlar. Bu alan hakkında kesin olarak bildiğimiz şey, burada uzayzamanın kendisinin de "kuantum köpüğünde" sonlanacak olan kuantum dansına katılmaya başlamak zorunda olacağıdır.

Kurama göre (farklı kütlelere, yüke, spine vs sahip olan) farklı parçacıklar, küçücük sicimlerin (tellerin) farklı şekillerde titreşmeleri sonucu ortaya çıkmaktadır; bu tıpkı kemandaki farklı notaların, tellerinin farklı şekillerde titreşmeleri sonucunda ortaya çıkmasına benzemektedir. Kuram matematiksel şıklığı ve kuantum kuramı ile kütleçekim kuramının olası bir birleşimine dair sunduğu provokatif ipuçları nedeniyle birçok büyük zekâyı kendisine çekmiştir. Evrendeki boyut sayısı hakkında da sarsıcı şeyler söylemektedir; bildiğimiz (zaman dâhil)

---

oks, 2000) ve *The Fabric of the Cosmos* (New York: Vintage Books, 2005)'dur.

107 Bir parçacığa, uzayzaman alanı boyunca genişleyebilen bir sanal parçacık kümesi eşlik eder, ancak kümenin merkezinde bir noktasal parçacık vardır.

dört boyut yerine belki on veya on bir boyut olduğunu savlamaktadır. Yine de halen ölçümleyebildiğimiz dünyaya dair somut bir şey söyleyebilmiş değildir. Kuram, şu ana dek deney yoluyla kontrol edilebilecek bir safhaya sahip olmuş değildir. Albenisine eşlik eden uzaktanlığı nedeniyle kimi fizikçiler kuramın fiziğin başka sokaklarına kıyasla aşırı bir emek gücünü peşinden sürüklediği tartışmasını gündemleştirmişlerdir. Dolayısıyla sicim kuramının matematiği yanında, bir de "sosyolojisi" sözkonusudur.[108]

Günümüzde deneylerin test edebildiği en küçük boyut 10^{-18} m iken, sicim kuramı neredeyse milyar çarpı milyar kere daha küçük olan 10^{-35} m.lik bir boyuttaki varsayımsal bir olguyla uğraşıyorsa, kuramı deneyle yüzleştirmeyi nasıl bekleyebiliriz? Bu sorunun birkaç yanıtı var. Bir yanıt, bunun fark etmeyeceği. Eğer kuram fiziksel dünya hakkında bildiğimiz her şeyi memnuniyet verici bir biçimde içeriyor ve bizim doğa tanımımızda peşinden koştuğumuz kapsayıcı sadelik arayışımızı tatmin ediyorsa, kuramı kabul etmeye ve inanmaya, yeni bir şey öngörmüyor olsa bile eğilim duyarız. Başka bir yanıt da "Kim bilir?" Cazip bir yoldan aşağı inmekten sadece bunun nereye varacağından emin olmadığımız için vazgeçmemeliyiz. Fizikte birçok büyük buluş, başlangıçta gerçek dünyayla alakası yok gibi görünen çalışmalardan çıktı. Üçüncü bir yanıt da var: O kesitte aşılamaz gibi görünen zamanın ve uzaklık ölçeklerinin güvenli limanlarına sığmayacak test edilebilir öngörülerde bulunmak da pekâlâ mümkündür. Günün birinde bir sicim kuramcısının şöyle dediğini düşünün: "Az önce müonun kütlesinin elektronun kütlesinin 206,768 katı olduğunu hesapladım." O zaman sicim kuramının yerini koruyacağına ve bu kuramcının da Stockholm'e bir davetiye alacağına emin olabilirsiniz.

100. "Ölçüm sorunu" nedir?

Kuantum kuramında birçok şey garip, hatta tüyler ürperticidir. Kimi yazarlar kuantum tuhaflığından bahseder. İki yarık-

108 (Epey tartışma yaratmış olan) Eleştirel bir yaklaşım için *bkz.* Lee Smolin'in kaleme aldığı *The Trouble with Physics* (New York: Houghton Mifflin, 2006).

tan birden geçen bir foton, birbirlerinden millerce uzaklıkta olmalarına karşın dolanık kalan bir çift atom şeylerin nasıl olması gerektiği yönündeki algımıza meydan okumaktadırlar. Bu "algı" nereden kaynaklanmaktadır o zaman? Soru 6'da tartıştığım gibi, bu bizim klasik fizik kurallarının ve kuantum olgularının yüzey altında kalarak doğrudan fark edilmediği, gündelik deneyimlerimizden çıkarsadığımız, sağduyu da diyebileceğimiz bir ortak algıdır. Gündelik yaşamları dalga fonksiyonları, sanal parçacıklar, üst üste binmeler, kuantum öbekler, kuantum sıçramalar ve dolanıklıkların ortasında geçen yaratıklara, kuantum fiziği hakkında hiçbir şeyin garip gelmeyeceği yönlü spekülasyonlarda bulunabiliriz.

Fizikçiler (en azından şimdiye dek) kuantum fiziğinin tüm öngörülerinin deney yoluyla teyit edilmesi gerektiğini kabul ettiler. Dolayısıyla bir yaklaşıma göre kuantum fiziğinin "ne anlama geldiği" veya gündelik düşünme biçimlerimizle nasıl uyumlulaştırılacağı yönündeki endişelere hiç gerek yok. Genellikle yanlış biçimde Richard Feynman'a atfedilen, ancak N.David Mermin'e ait olan bir aforizmada dendiği gibi[109] o zaman"çenemizi kapamalı ve hesaplamalıyız"; sezgilerimize hatta felsefi dünya görüşümüze aykırı olup olmamasına bakmaksızın, matematiksel olarak kuantum fiziğinin sonuçları üzerinde çalışmalı ve öngörüyü deneyle karşılaştırmalıyız.

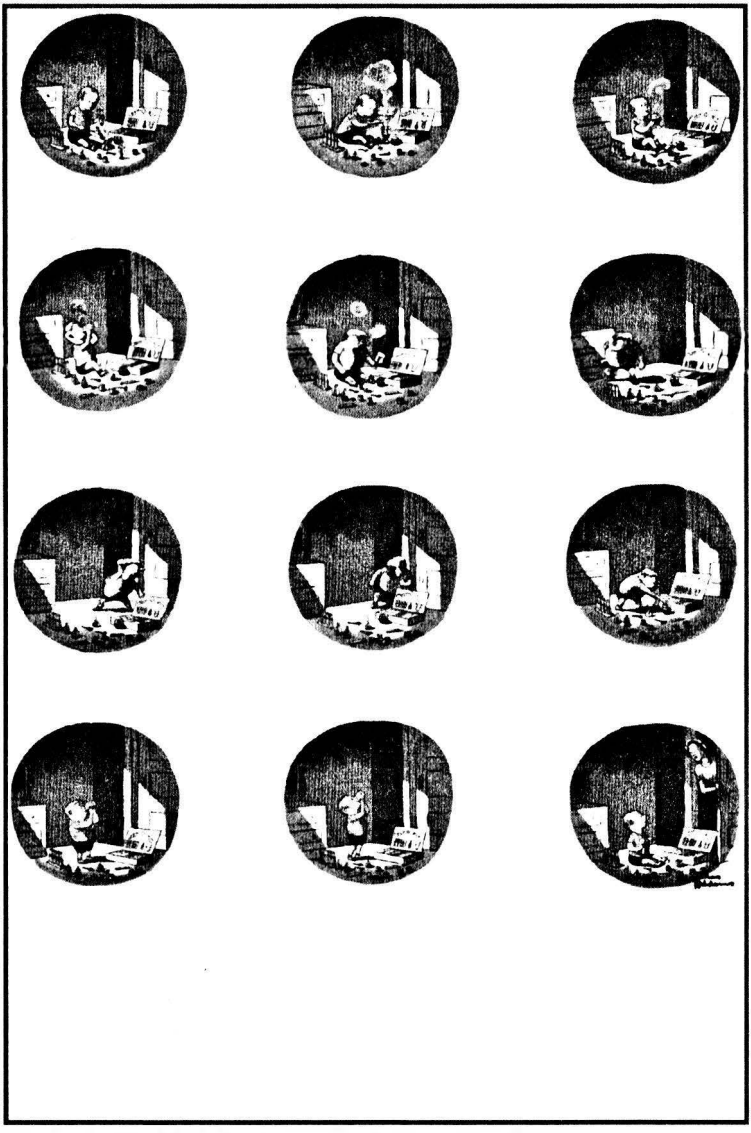
Yine de 1920'lerden günümüze dek uzanan zaman içerisinde fizikçiler kuantum fiziğinin anlamı ve öngörülerinin "gerçek" fiziksel dünya yaklaşımıyla nasıl uzlaşacağı üzerine endişelenmeye *devam ettiler*. Einstein olasılıktan hoşlanmadığı gibi, dolanıklığı da sevmedi. Yıllar boyunca birçok başka fizikçi de kuantum garipliğini doğrudan merkeze koyan "ölçüm sorunu"ndan bahsederek tartışmayı sürdürdü. Kuantum kuramının neredeyse ilk günlerinden bu yana fizikçiler genliği

109 Kuantumun garipliğine dikkat çeken çok sayıda beyanat vardır. Feynman öğrencilerini ve okurlarını kuantum fiziğini anlamazlarsa bir sorun olmadığı yönünde teskin eder, çünkü dediğine göre kendisi de anlamış değildir. Dolayısıyla Niels Bohr'un da "kuantum fiziği hakkında düşünürken kafanız karışmamışsa onu anlamıyorsunuz demektir" dediği rivayet edilir.

azalan dalga fonksiyonun nasıl özgül bir şu-anda-ve-burada ölçüme dönüştürülebileceğini düşünmeye kendilerini mecbur hissettiler. Kuantum sıçramaların bilindiği, ancak henüz dalga fonksiyonlarının olmadığı ta 1913 yılında Ernest Rutherford, (Niels Bohr'la birlikte) uyarılmış hareket durumundaki bir elektronun hangi düşük enerji durumuna sıçrayacağını nasıl bildiği sorusunu ortaya attı. Soru 26'da dikkat çektiğim gibi buna "ve ne zaman atlayacağını" ekini yapabilirdi. Bir düzine yıl sonra kuantum kuramcıları "dalga fonksiyonunun çöküşü" kavramını ortaya attılar. Bu fikre göre elektron (veya herhangi bir kuantum sistemi) uzayda bir dalga gibi yayılmaktaydı ve parçacığın özgün konumunu veya başka bir özelliğini ortaya çıkaran bir ölçüm yapıldığında, dalga fonksiyonu "çöküyordu". Bu olasılıktan gerçekliğe geçiş üzerine düşünmenin bir biçimiydi.

Çöken (ya da çöküşe uğrayan) bir dalga fonksiyonu fikri, genellikle kuantum mekaniğinin *Kopenhag yorumu* dediğimiz şeyle bağlantılıdır. Bu yorumun temel zorluklarından biri, dalga fonksiyonları ve olasılıkların hükmettiği kuantum dünyası ile bir sayacın ses verdiği veya bir ibrenin hareket ettiği yahut bir nöronun ateşlendiği klasik dünya arasına bir çizgi çekiyor olmasıydı. Ancak bu bulanık bir çizgidir. Uyumluluk ilkesini ortaya attığında Niels Bohr'un kendisinin de teslim ettiği gibi, kuantumdan klasik dünyaya geçiş aşamalıdır. Çizilmiş belirli bir çizgi yoktur. Çöken dalga fonksiyonu fikrindeki uç bir görüş de, insan bilincinin de ölçüme dâhil olduğu önermesidir. Bana, en azından bu hiç anlamlı gelmiyor. Öyleyse, yoluna çıkan bir X-ışını fotonu tarafından DNA'sı değişikliğe uğratılan bir mikrop veya yakınlaşan bir müon tarafından kristal yapısı değiştirilen bir mika parçası neden dâhil olmasın? Bu olaylar da "ölçümü" oluşturur.

Yine de "ölçüm sorunu"nda ısrar edilir. Üstü üste binmiş kuantum durumu potansiyelliği, belli bir ölçümün eylemselliğine dönüştüğünde sahiden tam olarak ne olmaktadır? 1950'li yıllarda John Wheeler'ın öğrencisi olarak Princeton Üniversitesi'nde gelecek vaat eden bir lisansüstü öğrencisi olan Hugh Everett, bu soruya bir yanıt önerdi; sonrasında bu



Annenin ölçümü bebeğin gerçekliğini belirliyor.

yanıtı kuantum mekaniğinin *çoklu dünyalar yorumu* olarak adlandırıldı. Ona göre dalga fonksiyonu çökmüyor, bölünüyordu. Bir parçacık spin yukarı ve spin aşağı durumlarının üst üste binmesindeyse ve spininin yukarıda olduğunu açığa çıkartan bir ölçüm yapılıyorsa, sonrasında da, Everett'in dediğine göre spini hem yukarıda hem aşağıda kalır; bizim dünyamızda yukarıda ve başka bir dünyada aşağıda. Sadece elektron spin etmez. İnsanın da başı döner. Çoğumuzun başaramayacağı şekilde, dalga fonksiyonunun her saniye milyarlarca kere alt bölümlenmelere ve daha alt-alt bölümlenmelere uğradığını hayal edin. Yine de Everett yorumunda en muhafazakâr matematikçi fizikçilerin bile beğendiği bir tutarlılık vardır. Niels Bohr'un beğenmediği ise muhakkaktır. John Wheeler ise, kendi akıl hocası Niels Bohr ile parlak zekâlı öğrencisi Hugh Everett arasında kalan, bizzat bir çeşit "üst üste binme" durumundaydı. Everett'in "ölçme sorununu" çözdüğünü söylemek haksızlık olmaz, ancak bunu epey yüklü bir pahaya başardığı da açık. 1982 yılında yaşamını yitirdiğinde, henüz görüşlerinin ortaya atıldıktan yarım yüzyıl sonra artan bir ilgiye mazhar olduğunu göremeyecek kadar gençti.[110]

Wheeler'ın başka bir öğrencisi, Wojciech Zurek kabaca dolanıklıktan kurtulma veya üst üste binmeden çıkma anlamına gelen "evre uyumsuzluğu" üzerine gerçekleştirilen çalışmaların öncülüğünü yaptı. Evre uyumsuzluğu, ölçüm sorununa yaklaşımın daha incelikli bir biçimini oluşturuyor. Çöken dalga fonksiyonu fikrinin yerini, burada bir kuantum sisteminin "çevresiyle" (bu genellikle daha büyük klasik bir sistem anlamına gelir) etkileşime geçmesi ve bu yolla kuantum üst üste binme özelliklerinin bazılarını ya da tümünü kaybetmesi alıyor. Çoklu dünyalar yorumunda olduğu gibi, evre uyumsuzluğu kuramı da yeni öngörülerde bulunmamakta veya "standart" kuantum öngörüleriyle herhangi bir biçimde çelişmemektedir. Dünyaya, özellikle de klasik ile kuantum arasındaki bulanık

110 Hugh Everett'in biyografisi için *bkz.* Peter Byrne'nin kaleme aldığı *The Many Worlds of Hugh Everett III: Multiple Universes, Mutual Assured Destruction, and the Meltdown of a Nuclear Family* (New York: Oxford University Press, 2010).

çizgiye yaklaşımda yeni ve belki de daha tatmin edici bir yol sunmaktadır.

101. Niçin kuantum?

Kitabı eski dostum ve yol göstericim John Wheeler'ın çok sevdiği bu sorusuyla kapatıyorum.[111] Bu sorunun yanıtını veya bir yanıtının olup olmadığını kimse bilmiyor. 1930, 1940 ve 1950'li yıllarda genç bir araştırmacı olarak Wheeler kuantum mekaniğinin "nedenini" sorgulamadı. Yol göstericisi Niels Bohr gibi o da olasılıklar, belirsizlik, dalga ve parçacıklar, üst üste binme, dolanıklık vs tüm bunların sadece dünyayı olduğu gibi yansıttığını kabul etti. Ne o, ne de başka bir araştırmacı, kuramın altında daha derin bir şeylerin yatıp yatmadığını bilmeye ihtiyaç duymadı. Küçük ölçekli dünyada çok sayıda olgu çarpıcı bir başarıyla açıklandığı için, onlar sadece kuramın zincirlerinden kurtularak önünün açılmasını sağladılar.

Ancak yaşı ilerledikçe Wheeler, Einstein'ın bakış açısına daha fazla yaklaştı ve kuantum mekaniğini geçici görmeye ve daha derin (ve belki daha basit) bir özün üzerindeki bir katman olarak düşünmeye başladı. "Ölçüm sorunu", bir diğer deyişle bir şekilde küçük ölçekli dünyanın muğlâklığı (olasılıkları) üzerine inşa edilmiş olan büyük ölçekli dünyada, muğlâk olmayan ölçüm sonuçları elde etmemiz onu düşündürüyordu. Wheeler, keşfedilmeyi bekleyen daha derin bir kuramın kuantum dünyasının tüm garipliklerini açıkça ve akla uygun biçimde açıklayacağını, dolayısıyla kuantum-klasik sınırındaki gözle görülür bulanıklığı gidereceğini tüm hücrelerinde hissetmeye başladı.

Kimi zaman şiire sığınmış olan Wheeler, bu kanısını şöyle ifade etmiştir[112]:

---

111 Wheeler 2008 yılında nükleer fizik, parçacık fiziği, kuantum fiziği ve kütleçekim ve görelilik fiziğine büyük katkılarla dolu parmak ısırtan bir kariyeri ardında bırakarak doksan sekiz yaşındayken öldü. Manhattan Projesi'nde ve onu izleyen termonükleer silahların geliştirilmesinde önemli bir figürdü.

112 Basılmamış bir şiir; Kitty Ferguson'ın *Stephen Hawking: Quest for a Theory of Everything* (New York: Bantam, 1992), s.21 kitabında kullanılmıştır.

Tüm bunların ardında
Kesinlikle
Öyle basit
Öyle güzel
Öyle ikna edici
Bir fikir var ki
On yıl
Yüz yıl
Veya bin yıl sonra
Bunu anladığımızda
Sesleneceğiz
Hepimiz
Birbirimize
Başka türlü nasıl olabilirdi?
Bunca yıl nasıl
Bu kadar aptal olabildik?

Kim bilir belki de Wheeler'ın düşü, bu kitabın okuyucularının yaşam süresi içerisinde gerçekleşecek. Öyle olmasını umarım. Bu zaman aralığında Soru 101 yanıtsız kalacak.

EK A

Tablo A.1 Leptonlar

İsim	Sembol	Yük (birim:e)	Kütle (birim:MeV)	Spin (birim: $\hbar$)	Karşı parçacık	Tipik bozunum	Ortalama Ömür
Çeşni 1							
Elektron	e	-1	0,511	1/2	e^+	Kararlı	
Elektron nötrinosu	ν_e	0	$2x10^{-6}$'dan az	1/2	$\bar{\nu}_e$	Diğer nötrinolara salınır	
Çeşni 2							
Müon	μ	-1	105,7	1/2	μ^+	$\mu \rightarrow e+\nu_\mu+\bar{\nu}_e$	$2,2 \times 10^{-6}$s
Müon nötrinosu	ν_μ	0	0,19'dan az	1/2	$\bar{\nu}_\mu$	Diğer nötrinolara salınır	
Çeşni 3							
Tau	τ	-1	1776,8	1/2	τ^+	$\tau \rightarrow e+\nu_\tau+\bar{\nu}_e$	$2,9 \times 10^{-13}$s
Tau nötrinosu	ν_τ	0	18'den az	1/2	$\bar{\nu}_\tau$	Diğer nötrinolara salınır	

Kaynak: Lawrence Berkeley Laboratuarı Parçacık Veri Grubu, http://pdg.lbl.gov/ .

Not: Yarı ömür = ortalama ömrün yüzde 69,3'ü.

Tablo A.2 Kuarklar

İsim	Sembol	Yük (birim: e)	Kütle (birim: MeV)	Spin (birim: $\hbar$)	Baryon sayısı	Karşı parçacık
Grup 1						
Aşağı	d	-1/3	4,1-5,8	1/2	1/3	$\bar{d}$
Yukarı	u	2/3	1,7-3,3	1/2	1/3	$\bar{u}$
Grup 2						
Acayip	s	-1/3	80-130	1/2	1/3	$\bar{s}$
Tılsım	c	2/3	1200-1360	1/2	1/3	$\bar{c}$
Grup 3						
Alt	b	-1/3	4200-4400	1/2	1/3	$\bar{b}$
Üst	t	2/3	172.000	1/2	1/3	$\bar{t}$

Kaynak: Lawrence Berkeley Laboratuarı Parçacık Veri Grubu, http://pdg.lbl.gov/ .

Tablo A.3 Kuvvet Taşıyıcıları

İsim	Sembol	Yük (birim:e)	Kütle (birim:MeV)	Spin (birim: $\hbar$)	Karşı parçacık	Taşınan Kuvvet
Graviton (varsayımsal, hiç gözlemlenmedi)	--	0	0	2	Kendisi	Kütleçekim
W	W^+	1	80.400	1	W^-	Zayıf
Z	Z^0	0	91.190	1	Kendisi	Zayıf
Foton	γ	0	0	1	Kendisi	Elektromanyetik
Gluon (8 parçacıktan oluşur)	g	0 (ancak 3 "renk yükü")	0	1	Kendisi	Yeğin
Higgs	H	0	125	0	Kendisi	

Kaynak: Lawrence Berkeley Laboratuarı Parçacık Veri Grubu, http://pdg.lbl.gov/ .

Tablo A.4 Bazı Bileşik Parçacıklar

İsim	Sembol	Yük (birim:e)	Kütle (birim:MeV)	Kuark Bileşimi	Spin (birim: ħ)	Tipik bozunum	Ortalama Ömür
Baryonlar (fermiyon olanlar)							
Proton	p	1	938,3	uud	1/2	Bilinmiyor	10^{29} yıldan fazla
Nötron	n	0	939,6	ddu	1/2	$n \rightarrow p+e+\bar{\nu}_e$	886 s
Lambda	Λ	0	1116	uds	1/2	$\Lambda \rightarrow p+\pi^-$	$2,6 \times 10^{-10}$ s
Sigma	Σ	1,0,-1	1189 (+&-)	uus(+), dds(-)	1/2	$\Sigma^+ \rightarrow n+\pi^+$	$0,80 \times 10^{-10}$ s (+&-)
			1193 (0)	uds (0)		$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda+\gamma$	7×10^{-20} s (0)
Omega	Ω	-1	1672	sss	3/2	$\Omega \rightarrow \Lambda+K^-$	$0,82 \times 10^{-10}$ s
Mezonlar (bozon olanlar)							
Pion	π	1,0,-1	139,6 (+&-)	$u\bar{d}$ (+), $d\bar{u}$ (-)	0	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$	$2,6 \times 10^{-8}$ s (+&-)
			135,0 (0)	$u\bar{u}$ & $d\bar{d}$ (0)		$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$	8×10^{-17} s (0)
Eta	η	0	548	$u\bar{u}$ & $d\bar{d}$	0	$\eta \rightarrow \pi^+ + \pi^0 + \pi^-$	$5,6 \times 10^{-19}$ s
Kaon	K	1,0,-1	494 (+&-)	$u\bar{s}$ (+), $\bar{u}s$ (-)	0	$K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$	$1,24 \times 10^{-8}$ s (+&-)
			498 (0)	$d\bar{s}$ & $\bar{d}s$ (0)		$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$	$0,89 \times 10^{-10}$ s (0)

Kaynak: Lawrence Berkeley Laboratuarı Parçacık Veri Grubu, http://pdg.lbl.gov/.

Not: Yarı ömür = ortalama ömrün yüzde 69,3'ü.

EK B

Tablo B.1 Büyük ve Küçük Çarpanlar

Kat	İsim	Sembol	Kat	İsim	Sembol
Yüz 10^2	Hekto	h	Yüzde bir 10^{-2}	Santi	c
Bin 10^3	Kilo	k	Binde bir 10^{-3}	Mili	m
Milyon 10^6	Mega	M	Milyonda bir 10^{-6}	Mikro	μ
Milyar 10^9	Giga	G	Milyarda bir 10^{-9}	Nano	n
Trilyon 10^{12}	Tera	T	Trilyonda bir 10^{-12}	Piko	p
Katrilyon 10^{15}	Peta	P	Katrilyonda bir 10^{-15}	Femto	f
Kentilyon 10^{18}	Exa	E	Kentilyonda bir 10^{-18}	Atto	a

Tablo B.2 Ne Kadar Büyük

Fiziksel Nicelik	Kuantum dünyasındaki tipik büyüklüğü
Uzunluk	Atomun boyutu, yaklaşık 10^{-10} m (0,1 nanometre veya 0,1 nm)
	Protonun büyüklüğü, yaklaşık 10^{-15} m (1 femtometre veya 1 fm)
	"Planck uzunluğu", yaklaşık 10^{-35} m
Zaman	Bir parçacığın bir çekirdekten geçme süresi, yaklaşık 10^{-23} s.
	"Uzun yaşamış" parçacığın tipik yarı ömrü, yaklaşık 10^{-10} s.
Hız	Işık hızı (c), 3 x 10^{8} m/s
	Atomdaki elektronun hızı, yaklaşık 0,01c ile 0,1c arası
	Hızlandırıcıdaki parçacığın hızı, c'ye çok yakın
Kütle	İki elektronun kütlesi, yaklaşık 1 milyon eV veya 1 MeV
	Protonun kütlesi, yaklaşık 1 milyar eV veya 1 GeV (1 GeV kütle enerjisi = 1,78 x 10^{-27} kg)
Enerji	Oda sıcaklığındaki hava molekülü 1 eV'tan az. Yeşil ışık fotonu, yaklaşık 2 eV
	Katot ışını tüpündeki elektron 10^{3} eV (1 keV)'den çok En büyük hızlandırıcıdaki foton, 7 x 10^{12} eV (7 TeV)
Elektrik yükü	Yükün kuantum birimi (e), 1,6 x 10^{-19} kolomb (1 kolomb 1 W'lık küçük bir gece ışığını 1 saniyeliğine aydınlatır)
Spin	Spinin kuantum birimi ($\hbar$), yaklaşık 10^{-34} kg x m x m/sn Fotonun spini, $\hbar$
	Elektron veya kuark veya protonun spini, (1/2) $\hbar$

Dizin

137 (sayı olarak) 295-299

A

Aczel, Amir 298
açısal momentum 3, 29, 50-54, 59-66
  spin ve yörünge açısal momentumların birleştirilmesi 66-67
  korunumu 52-54, 172, 176
  dönme etkinliğinin ölçütü olarak 50
  kuantum öbekliliği 3, 4, 51-52
  toplanmasının kuralları 53
  Ayrıca *bkz.* Spin
akb 108
akı *bkz.* manyetik akı öbekliliği
Alda, Alan 32
alfa bozunumu 115-117
alfa parçacıkları
  yok olması 25, 26, 29, 30
  adlandırılması 114
  fırlatılması 252, 253
algılayıcılar 255-259
Allen, John 284, 285
alt kuark 153-154
amu 107, 108
amplifikatör 272, 273
AM radyo 244, 245
Anderson, Carl, 256
antisosyal parçacıklar
  "büyük fikir" olarak 14, 15
  Ayrıca *bkz.* Fermiyonlar
Aristoteles 309, 310
astronotlar, hızları 58-59
Atkinson, Robert 279-280
Atlas 256-258
atom çekirdeği *bkz.* Çekirdek
atom kütlesi 107-109
atom kütle birimi 107-108
atom numarası 107-109
atom(lar)
  iç yapısı 23-27
  genişliği 222-223
  boyutları 23-24, 102-104
Ay'a çıkış 58-59
ayna değişmezliği *bkz.* eşdeğerlik
ayna simetrisi 209-210
ayrışma
  tanımı 53-56
  maddenin 53-54

B

b fabrikaları 159
bağlanma sabiti 296-298
Bahcall, John 141, 143

bakır, harika bir iletken olarak 263-265
Balmer dizileri 98-100
Balmer, Johann 98-100
bant açığı 265-266
kuantum beneklerde 288
Bardeen, John 271-272
ve süperiletkenlik 281-283
bariyer aşma *bkz.* tünelleme
baryonlar
tanımı 150-151
özellikleri 323
baryon sayısı korunumu 184, 188-189
bayt 306
baş kuantum sayısı 80-84, 103-104
BCS kuramı 282-284
Bekenstein-Hawking ışıması 277-278
Bekenstein, Jacob 276-278
belirsizlik ilkesi 240-243
"büyük fikir" olarak 14-15
klasik 242-246
klasik kuantum karşılaştırması 245-246
konum-momentum biçimi 241, 244-245
zaman-enerji biçimi 144-146, 241-243
ve sanal parçacıklar 181-182
ve dalgalar 242-246
Bell laboratuarları 214-215, 261-262, 271-272
Bell eşitsizlikleri 301-305
çiğnenmesi 304-305
Bell, John 301-302
Bernstein, Jeremy 280
beta bozunumu 116-199
beta parçacıkları, adlandırılması 114
Bethe, Hans
Teller'le ilişkisi 280
ve güneşte füzyon 279-280
Binnig, Gerd 229-230
bit 304-305
birleşme, füzyon 125-128
tanımı 121-122
güneşte yavaş füzyon 127-128
güneşte 125-128, 279-282
birleşik model 37-38, 106-107
Bohr, Aage 10-107
Bohr, Niels 22-23, 82, 233
Everett'in çalışmasına bakışı 313, 315
kuantum fiziğine bakışı 315-316
ve uyumluluk ilkesi 21-23, 313, 315
ve fisyon (bölünme) kuramı 124-125
ve "elektron nasıl biliyor?" 312-313
ve hidrojen atomu kuramı 98-100
ve sıvı damlacığı modeli 37-38
ve yörünge açısal momentum 67-68
ve temel kuantum sayısı 80-81
ve kuantum sıçrama 83-85
ve sabit durum 74-75
Bohr yörüngeleri 217-218
Boltzmann, Ludwig 166-168
Born, Max 90-91
borazan, borazanda öbekli tonlar 75-76

Bose-Einstein yoğunlaşması 162-166
ve helyum-4 süper alışkanlığı 284-285
Bose, Satyendra Nath 165-168
ve bozonlar 306-307
bozonlar
tanımı 150-151
fermiyonlara karşı 159-163
adlandırılmaları 169
bozunum
bozunumda değişiklikler 188-189
tek parçacık ürününün yasaklandığı 185-186
bölünme, fizyon 37-38, 121-126
tanımı 121-122
ve sıvı damlacık modeli 104-105
kendiliğinden 123-124
kuramı 124-125
Brattain, Walter 271-272
Brookhaven Ulusal Laboratuarı 131-132, 136, 156, 205, 290-291
Brown hareketi 23-24
Brown, Robert 23, 24
büyük fikirler 13-15
Büyük Hadron Çarpıştırıcısı 157-159, 238-239, 253-255
detektörler 256-257
enerjisi 62-64
ve Higgs bozonu arayışı 309-310
ve süper iletkenlik 283-284
Büyük Patlama 291-292
Byrne, Peter 315

C

CERN 157-158, 301-302
ve kuark-gluon plazması 291
Ayrıca bkz. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı
Chadwick, James, 37, 104-105
cıva, süper iletken olarak 281-282
Compton, Arthur 166-167
Compton etkisi 166-167
ve ışığın parçacık doğası 214-215
Condon, Edward 85-86
Cooper çiftleri 282-286
Cooper, Leon 281-283
Cornell, Eric 165, 165
Coulomb, Charles Augustin 65
Cowan, Clyde, Jr., 30-31, 133-134
CP değişmezliği 205-207
Cronin, James 205-207
Curie, Marie 114
çarpanlar 320
çekirdek
biçim kaybı 39-40
keşfi 25-27
yarıçaplar 37-39
büyüklüğü 35-39
yapısı 37-40
çekirdekteki protonlar 103-107
çekirdek nötronlar 103-107
çeşni
tanımı 150-151
lepton çeşnisi 129-133, 193-194, 198-199
kuark çeşnisi 198-207

çiftler 199-200
çift yarık deneyi 225-229
çizgi spektrumu 94-96
  hidrojen basitliği 98-100
çoklu dünyalar yorumu 313, 315-316

D

daimi hareket 20-21
dalga boyu
  bir insanın 216-217
  bir noktadaki 233-234
  belirsizliği 243-245
  görünür ışığın 94
dalga fonksiyonu 159-161, 231-235
  çöküşü 312-313
  kavisliği 233-235
  kesinliği 231-233
  ve olasılığı 234-238
  iki parçacığın 161-163
dalga fonksiyonu çöküşü 312-313
dalga fonksiyonunun kavisliliği 233-235
  kesinliği 217-218
  ve olasılığı 221-224
  iki parçacığın 145-146
dalgalarda kuantum öbekler 217-222
dalgalar
  gerekli midir? 248-250
  atomun içerisinde 218-222
  hidrojen atomunda 82
  lokalizasyonu 243-245
  lokalize olamamaları 237-240
  potansiyalite olarak 249-250
  ve küçük mesafelerin araştırılması 238-240
  ve kuantum öbekler 217-222
  radyo 96-97
  parçacıklarla ilişkisi 213-215
  ve atomların büyüklüğü 221-224
  ve durağan durumlar 75-76
  üst üste binmesi 242-245
dalga-parçacık ikiliği 29-30, 216-217
  büyük fikir olarak 161-163
dallanma oranı 88-89
Davis, Raymond 118, 140-143, 144-145
Davisson, Clinton 214-216
de Broglie denklemi 214-218, 237-238
de Broglie, Prince Louis Victor 214-216, 217-221, 233
değişim
  saçılım ve bozunumda 188-189
delikler 266-267
dışarlama ilkesi 162-163
  ve ağır atomlar 103-104
  ve elektronların özdeşliği 146-147
  metallerde 163-165, 264-265
  ve di-nötron olmaması 121-122
  çekirdekte 111-112
  ve periyodik tablo 98-103
di-nötron, yokluğu 120
di-proton yokluğu 113-114, 120
Dirac, Paul 169, 233

ve manyetik kutuplar 296-297
diyotlar 268-276
kullanımı 269-271
doğrusal hızlandırıcılar 254-255
dolaşık hal 302-304
dolaşıklık 298-301
kavramın çıkışı 300-301
doping, katkılama 265-266
dönüşüm 114, 123
"dört büyük" korumunu yasası 191-194
dört uçlu köşe noktaları 179-181
döteron, kararlılığı 119-120
durumların genliği 304, 305
dünya çizgileri 172-173
dt tepkimesi 125-126

E

$E = mc^2$ *bkz.* kütle-enerji denkliği
eigenfunction 236
Einstein, Albert 47, 233
kuantum fiziğine bakışı 84-85, 90-91, 227-228, 250, 299-300, 312-313
ve Bose-Einstein yoğunlaşması 165
ve bozonlar 165-168
ve Tanrı 91
ve kütle-enerji denkliği 60-62
ve Nobel ödülü 47-49
ve foton 45-46
ve Planck 46
alıntısı 91-92
ve uyarılmış yayınım 258-260
Ayrıca *bkz.* EPR
Einstein-Maric, Mileva 47
elektrik kuvvet bariyeri 115-116
elektrik yük 64-65
korunumu 65-66, 184-186, 188-189, 192-193, 194+
öbekliği 19-20, 65-66
ölçeksel nicelik olarak 65-66
elektromanyetik etkileşim 179-183
elektromanyetik kuvvet
takas kuvveti 56
erimi 54-56
elektromanyetizma, klasik 96-97
elektron(lar)
keşfi 30-32
özdeşliği 145-147, 159
ortalama ömür sınırı 185-186
kütle-yük oranı 31-32
fırlatılan cisim olarak faydaları 254-255
metallerde 73-74, 163-165, 262-265
çekirdekte 35-37, 104-105
nokta parçacıklar olarak 31-32
pratik kullanım değeri 32-33
özellikleri 29-33, 322
spini 68-69
kararlılığı 185-186
dalga boyu 214-215
elektron nötrinosu
kütle sınırı 38
özellikleri 322

elektron volt 62-63
tanımı 40
elektrozayıf kuram 57-58
element, tanımı 108-109
emitör (transistörde) 272-273
enerji
korunumu 187-188, 211-212
hareket enerjisi 221-223
potansiyel enerji 221-223
enerji-kütle denkliği *bkz.* kütle-enerji denkliği
enerjinin kütleye çevrilmesi 64
EPR 299-304
eşdeğerlik, parite 197-198, 201-203, 209-210
eşleşme sabiti 296-297
Everett, Hugh 313, 315
evrende boyutlar 310-311
evrensel Fermi etkileşimi 180-181
evre uyumsuzluğu 314, 317

F

Farm Hall 279-280
Ferguson, Kitty 317
Fermi, Enrico 37-38, 130-131, 169, 233
ve fermiyonlar 306-307
ve ilk reaktör 125
ve hızlandırıcıların boyutları 238-239
ve zayıf-etkileşim kuramı 179-180
Fermilab 130-131, 157-159
ve süper iletkenlik 283-284
ve tau nötrinosunun keşfi 129-130, 137
Fermi, Giulio 37
Fermi, Laura 37
Fermi, Nella 37
Fermi-Dirac istatistikleri 169
fermi (uzaklık birimi) 53-54
fermiyonlar
bozonlarla karşılaştırma 159-163
tanımı 150-151
Feynman, Richard 32, 171-175
zamanda geriye doğru hareket 179-180
ve müonun gizemi 131-132
ve dalgasız parçacıklar 249-250
Wheeler aforizmasına tepkisi 276
aforizma kaynağı olarak 312-313
ve çift yarık deneyi 227-229
Feynman diyagramları 171-176
özellikleri 175-180
ve etkileşim biçimleri 179-183
ve müon bozunumu 180-181
ve nötron bozunumu 181-182
fisyon *bkz.* bölünme
Fitch, Val 205-207
fizikte birleşmeler 96-97
florin-18 92
beta bozunumu 117-118
fotoelektrik etki 46-49, 166-167
fotoğrafik çözeltiler 131-132
fotonlar 45-48

ve Einstein 48-49
kara delik tarafından yayılan 279
değişimi 174-176
adlandırılması 46, 48
pozitron imhasında 69-70
özellikleri 322
kuantum öbek olarak 17
yavaş kabul görmesi 130-131
ve dalga-parçacık ikiliği 214-215
fotovoltaik pil 270-271
Fourier, Jean Baptiste Joseph 242-244
Fraunhofer çizgileri 94-96
Fraunhofer, Joseph von 94-96
frekans(lar), sıklık
mekanik ve ışınım yoluyla 97-98
doğal 97-98
füzyon *bkz.* birleşme
füzyon reaktörleri 128

G

gama ışınları, adlandırılması 114
Gamow, George 85-86
ve güneşte füzyon 279-280
Garwin, Richard 202-203
Geiger, Hans 255
Geiger sayacı 255
Gell-Mann, Murray 41, 151-153
ve omega-eksi öngürüsü 156
gerçeklik katmanları 146-147
Germer, Lester 214-216
Gilder, Loisa 298
girişim alanı, girişim 226-229
Glaser, Donald 258-259
Glashow, Sheldon 56-57
gluonlar
renkleri 153-155
değişimi 182-183
takas parçacıkları olarak 56
temel parçacıklar olarak 50-51
özellikleri 268
Goeppert Mayer, Maria 105-106
Goudsmit, Samuel 67-69, 82-83, 233
gözlemlenebilir 159-161
graviton 182-184
Greene, Brian 309
Gurney, Ronald 85-86

H

hapsedilme 71-72
harita 171-172
h bar ($\hbar$) 45-46
küçük değeri 73-74
açısal momentum birimi olarak 68-69
Ayrıca *bkz.* Planck sabiti
Hawking, Stephen 276-278
Hawkin ışıması 277-278
Hersenberg Werner, 145-146, 233, 240
helyum
atom 100-101
keşfi 96
helyum-3 284-285
helyum-4
çekirdeği 106-107
Hertz, Heinrich, 96-97

Higgs, Peter 306-308
Higgs mekanizma 308
Higgs parçacığı 306-310
Hofstadter, Robert 39-41
Houfermens, Fritz 279-280
hidrojen atomu
  çapı 17-18
  uyarılmış durumda 86-87
  taban durumu 236-238
  büyüklüğü 102-104
hidrojen atomunda bağlanma enerjisi 100

I

IBM laboratuvarı 230
ışık
  elektriksel bir olgu olarak 96-97
  dalga boyları 53-54
ışık yayan diyot 269-270
Ingres, Jean Auguste Dominique 209-210
iletim bandı 263-265
  kuantum beneklerde 288
iletken 262-265
iletkenlik 266-267
ince yapı sabiti 296-297

J

Jansenn, Pierre 95-96
Jensen, Hans 104-107
Josephsan, Brian 285-286
Josephson eklemlerinde faz farkı 285-286

K

kabarcık odası 258-259
kabuklar
  atomlar 102-103
  çekirdekler 104-107
kapalı kabuklar
  atomlarda 104-105
  çekirdeklerde 104-105
Kapitsa, Pyotr 284-285
kara delik
  kavramın ilk ileri sürülüşü 54
  buharlaşması 275-279
  küçük ölçek altı 277-278
kara deliğin entropisi 276-278
kararlılık çizgisi 112-114
karbon-12 108-109
karbon 14 108-109
  beta bozunumu 116-118
  tarihleme 108-109
  yarı ömrü 117-118
karpuz modeli 25
karşı nötrinolar 133-135
  reaktörde üretilmeleri 133, 134
karşı parçacık
  tanımı 150, 151
katkı maddesi olarak arsenik 265-266, 271-272
katkı maddesi olarak fosfor 265-266
katot ışın tüpü 30, 251, 252
katot ışınları 30
kavrama zemini 146-147
KED *bkz.* kuantum elektrodinamik
kesinlik
  kuantum dünyasında 91-92
Ketterle, Wolfgang 165-166
kırınım 224-226
  tanımı 213-214, 224
  elektronların kırınımı 214-216
  çift yarık deneyinde 226-227

kırınım ağı 93-94
kırınım ağı, kırınım, 93-94
kinetik enerji 221-23
klasik fizik tanımı 20-21
klasik-kuantum sınırı 21-23
kobalt-60 202-204
kolektif (birleşik) model 38-57, 106-107
kompozit parçacıklar 154-159
  boyutları 157-158
Kopenhag yorumu 312-313
korunum
  "büyük fikir" olarak 14-15
  tanımı 208-209
  simetri ve değişmezlikle bağı 208-212
korunum yasaları 187-189
  mutlak 191-195
  kısmi 198-202
  klasik 192-193
  Ayrıca *bkz.* birbirlerinden ayrı olarak geçerli (bağımsız) yasalar
kovuk ışınımı 41-44
  Bose'nin formül çıkarımları 166-167
kozmik ışınlar 58-59, 130-131, 252-253
  ilk 131
köşe noktaları
  dört uçlu 179-181
  doğası 179-180
  üç uçlu 175-176, 180-181
kuantum benekler 288-289
  kuantum kubitler olarak 306-307
kuantizasyon, öbeklilik
  açısal momentumun 19-20
  "büyük fikir" olarak 13-14
  yükün 19-20
  parçacık özelliklerinin 71-74
  özelliklerin 17-20
  spinin 19-20
  şeylerin 17-20
kuantum elektrodinamiği 31-32, 130-131
kuantum etkileri, büyük ölçekli 20-21
kuantum fiziği
  nedeni 315-317
kuantum hesaplama 305-307
kuantum-klasik sınırı 21-23
kuantum köpüğü 54-56, 292-293, 310-311
kuantum sayılar 78-84
  oryantasyon, uyum 79-81
  başlıca 80-84, 103-104
  spin uyumunun 82-84
kuantum sıçrama 83-87
  tanımı 88-89
kuantum, tanımı 17
kuark-gluon plazması 289-292
kuarklar
  alt 153-154
  tılsım 153-154
  rengi 182-183
  tanımı 149-150
  arasındaki kuvvetler 41
  temel parçacık olarak 50-51
  nesilleri 144-145
  isimleri 50-51
  kabul edilen 41
  özellikleri 150-155, 321
  gerçekliği 41
  utangaçlığı 41-42
  spini 68-69

kuark sayısı 152-154
korunumu 184, 193-194
kurşun-208
çekirdeği 106-107
kurşun-209
LED *bkz.* ışık yayan diyot
kutuda parçacık 234-236
kuvvet(ler)
atomlar arasında 28-29
yüklü parçacıklarda 251-255
kuvvet taşıyıcıları 174-175, 187-188
tanımı 149-150
temel niteliği 50-51
özellikleri 322
Ayrıca bkz. takas parçacıkları
kutup kuvveti, manyetik 296-299
kütleçekim kuvveti
ve korunum yasaları 198-199
mesafesi 54-56
kütleçekim sabiti 291-292
Kütleçekim Sondası B 284-286
kütle-enerji denkliği 60-64
"büyük fikir" olarak 14-15
ve radyoaktivite 115-116
kütlenin enerjiye çevrilmesi evrenselliği 61-63

L

Lamb, Wills 261-262
lamba parçacığı 88-89, 151-152
özellikleri 323
Lawrence, Ernest 252-253
Lawrence Livermore Ulusal Laboratuarı 262
lazer diyot 269-271
lazerler 258-263
LED *bkz.* ışık yayan diyot
Lederman, Leon 136, 137, 308
ve P ve C değişmezlik testi 202-203
Lee, Tsung Dao 201-202
lepton 129-133
tanımı 149-130
çeşnileri 129-133
özellikleri 322
lepton çeşnisi 198-199
korunumu 193-194
lepton sayısı 152-153
korunumu 188-189
Lewis, Gilbert 46, 48
LHC *bkz.* Büyük Hadron Çarpıştırıcısı
lityum atomu 101
Lockyer, Norman 95-97
lokalizasyon 243-245
olasılığa bağlı 248-249

M

madde,
sağlamlığı 28-30
Maiman, Theodore 261-262
Manhattan Projesi 316
mantık kapısı 306
manyetik akı kuantizasyonu 283-284, 287
maser 261-262
Maxwell, James Clerk 96-97, 167-168
Maxwell-Boltzmann istatistikleri 167-168
Mayer, Joseph 105
Mayer, Maria 105-107

Mayer, Marianne 103
McCarthy, Senatör Joseph 86
Mermin, N. David 312-313
mezonlar
  bileşimi 154-155
  tanımı 150-151
  özellikleri 323
mıknatıslar,süper iletken 283-284
Millikan, Robert 48-49
Misener, Donald 284-285
moleküller, hızları 58-59
momentum korunumu 185-186, 187-188, 192-195, 194
  uzayın türdeşliği ile ilişkili olarak 211-212
Mottelson, Ben 106-107
müon(lar)
  kozmik ışınlardan 255
  bozunumu 180-181
  keşfi 131-132
  ortalama ömrü 59-60, 133-134
  doğası 131-132
  özellikleri 320
müon nötrinosu
  özellikleri 320

N

nanoteknoloji 289
nesiller 133
  sadece üç mü? 143-146
  kuark nesiller 144-145
neon atomu 102-103
Newton, Isaac 93-94
Newton'un ilk yasası 211-212
Noether, Emmy 210-211
Noether'in kuramı 210-212
nokta parçacıklar 31-32
nötrinolar 133-137
  "tamamen zayıf" olarak 134-135
  elektron çeşnisinde 133-134
  çeşni durumları 139-140
  elli olması 204-205
  nötronla etkileşim 186
  sol elli 197-198
  kütlesi 137-144
  müon çeşnisinden 136-137
  pion bozunumundan 204-205
  güneşte 141-145
  tau çeşnisinden 137
  Ayrıca bkz. karşı nötrinolar
nötrino salınımı 140-144
nötron
  beta bozunumu 119
  bozunumu 179-180, 181-182
  keşfi 37
  içi 39-41
  kütlesi 35-36
  ortalama ömrü 59-60
  çekirdek bileşeni olarak 37, 41
  özellikleri 323
  kuark bileşenleri 181-182
  büyüklüğü 35-36, 39-41
  stabilizasyonu 119-122
  Ayrıca bkz. nükleonlar
nötron sayısı 107-108
nötron-proton oranı 112-113
n-p-n transistörü 271-273
nüfus tersinimi 260-263, 270-271
nükleer fizyon *bkz.* fizyon
nükleer füzyon *bkz.* füzyon
nükleer kuvvet 111-112
  spin bağlılığı 120
nükleer patlama 124-125

nükleon başına kütle 121-124
nükleonlar
tanımı 150-151
çekirdekteki 103-107

O

olasılığa bağlı 116
olasılık
"büyük fikir" olarak 13-14
klasik 92
sabit değerleri 86-89, 91-92
temel 90-91
habersizlik olasılığı 90-91, 234-235
üst üste binmeye bağlı 247-248
dalga fonksiyonuna bağlı 234-237
kuantum fiziğinde rolü 86-91
olaylar 14, 66, 89, 90, 118, 124, 173-174, 189, 206, 217, 310, 313
olay ufku 276-277
Omega-eksi parçacığı 156
Onnes, Heike Kamerlingh 281-282
oransallık sabiti 60, 61-66
ortalama ömür
deney yoluyla belirlenmesi 86-89
bozunum olasılığıyla ilişkili 88-89
Ayrıca *bkz.* yarı-ömür ölçüm sorunu
oryantasyon, kuantizasyonu 79-81
öbeklilik, kuantum 71-72
özdeş parçacıkları 230

P

parçacıklar
kompozit 48-49, 154-159
sayma sayısı 152-154
"asli" 49-50
temel 48-51
özdeş 167-182
lokalizasyonu 243-245
temel parçacık sayısı 49-51
gerçeklik olarak 249-250
dalgalarla ilişkili 213-215
kararlı ve kararsız 184-186
acayip 150-152
sanal 31-32, 180-182
parçacıklarla ilişkili alanlar 308
parçacıkların küresel özellikleri 74-75
parite 195, 197, 202, 203
Pauli, Wolfgang 82-86, 129-130, 233
ve dışarlama ilkesi 162-163
penta kuark 27
periyodik tablo
sonlanması 111-114
kuantum açıklaması 98-103
Perl, Martin 130-133, 137
Perrin, Francis 125-126
PET tarama 92
Pines, David, 282-283
pion(lar)
bozunumu 192-194, 202-205, 298-300
tanımı 150-151
keşfi 131-132
özellikleri 323
pion-proton çarpışması 200-201

Planck, Max 43-44
ve Einstein 46
ve yeni sabit 291-292
Planck ölçeği 310-311
Planck sabiti 41-46
kuantum denklemlerinde sıkça görülmesi 216
ve belirsizlik 241
Planck uzunluğu 54-56, 59-60, 291-293
kavramın ortaya atılışı 54
Planck-Wheeler uzunluğu 292-293
Planck zamanı 59-60, 292-293
plazma 289
p-n eklemi 266-270
Podolsky, Boris 299-300
potansiyel enerji 221-223
Powell, Cecil 130-132
pozitron
keşfi 256
PET seanslarında 92
pozitron-elektron imhası 64, 68-70, 177
pozitronyum 155
prizma 93-95
proton
keşfi 35-36
içyapısı 39-41
ortalama ömür sınırı 184
kütlesi 35-36
çekirdek bileşeni olarak 35-37, 41
özellikleri 323
yarıçapı 39-41
büyüklüğü 35-36
Ayrıca bkz. nükleonlar
proton-proton saçılımı 208

R

Radi, I. I. 131-132
radyasyon
kara delik tarafından 277-278
boşluk 41-44
yoğunluğu 44
kuantize 43-44
ısı 41-44
radyo dalgaları 96-97
radyoaktivite 113-119
radyum 226
alfa bozunumu 116-117
yarı ömrü 116-117
reaktör 124-125
doğal 125-126
Reines, Frederick 133-134
Retherford, Robert 261-262
Rohrer, Heinrich 229-230
Rosen, Nathan 299-300
rubidyum-85 159, 163-165
Rutherford, Ernest 25-26, 35-36
nükleer fiziğin doğuşu 103-104
Bohr'un 1913 çalışması 98-100
kuantum sıçraması 84-85
radyoaktivite 114
renk 153-155
korunumu 188-189, 193-195
tanımı 150-151
kuarklarda 156, 182-183
renk yükü 194, 195
renksiz parçacıklar 153-154, 194-195

S

sağduyu kuantum duyuya karşı 13-14, 29-30, 300-301
Salam, Abdus 57
salınım, nötrino 140-144
sanal parçacıklar 31-32, 180-182
  ve kara delik ışıması 277-278
Schowlow, Arthur 261-262
Schiffer, John 233
Schrödinger, Erwin 232-233, 300-301
Schrödinger, denklemi 232-234
Schwartz, Melvin 136
Schwinger, Julian 171-172
Shockley, William 271
senkrotronlar 253-255
sıcaklık
  kara deliğin sıcaklığı 277-278
  Güneş'in merkezinde 279
sıfır noktası enerjisi 74-75
sıvı damlacık modeli 37-38 104-107
sıvı çözeltiler, fotoğrafik 131-132
sigma parçacığı
  çürümesi 200-201
  özellikleri 323
sihirli sayılar 106-107
siklotron 252-254
simetri
  tanımı 208-209
  süreklilik 209-211
  sürekenlik 209-210
  örnekler 209-210
  değişmezlik ve korunumla ilişkili 208-212
simetri ilkeleri, kısmi 201-207
Simios, Nicholos 156
sis odası 256
"soğuk, karanlık madde" 275-276
soğurma 79, 81, 102, 245, 278
  yokolma olarak 228, 229
  ışığın soğurulması 258, 259
spektrum 93-95
spin 66-70
  kuantine 19-20
  üst üste binme 139-140
Sudbury Ntörino Gözlemevi 142-144, 186
  "büyük fikir olarak" xiv
  kuantizasyonu 3-4
  üst üste binmesi 123
  birimi 4
  ayrıca *bkz.* açısal momentum
süreklilik, görünümü 75-76
Süper Kamiokande 141, 143
Stelin, Joseph 2844
SLAC *bkz.* Steford Dafisol Hızlandırıcı
SNO *bkz.* Sudbury Nitrino Gözlemevi
Stanford Doğrusal Hızlandırıcı 254-255
  enerji 62-63
  elektronların hızı 58-59
  tou'nun keşfi 131-133
Steinberger, Jack 136
STM 228-230

T

taban durumu 74-75
  hidrojen atomunun 82-83, 236-238

takas kuvveti 174-175
takas parçacıkları
  temel niteliği 50-51
  Ayrıca *bkz.* kuvvet taşıyıcıları
tanesellik *bkz.* taneciklik
taneciklik 20-21
tau 137
  keşfi 131-133
  özellikleri 320
tau nötrinosu 137
  özellikleri 320
TCP kuramı 194-199
  pion bozunumuna uygulanması 197-199
tek-çift etkisi 125
tek kutuplular, manyetik 296-298
telefon ahizesi 245-246
Teller, Edward 262-263
  Bethe ile ilişkisi 281
  güneş füzyonu 279-280
temel kuantum sayısı 81-103
tepe aşağı kuralı 88-90, 187-188, 192-193
Teresi, Dick 308
termonükleer tepkimeler 128
Tevatron 157-158, 159
  enerjisi 62-63
  Higgs bozonu arayışı 309-310
Thomson, George 30, 214-216
Thomson, J. J. 30-32, 129-130
tılsımlı kuark 153-154
Tomonaga, Sin-Itiro 171-172
Townes, Charles 261-262
transistörler 272-273
  n-p-n 271-273
  p-n-p 273
(transistör) tabanı 272-273
transmutasyon 114
triton, bozunumu 137-138
triyot 272-273
  üçlüler 199-200
Tukey, John 304
tükenme bölgesi 268
tünelleme 115-116, 228-230
  alfa bozunumunda 86-87
  Josephson eklemlerinde 285-286
  güneş füzyonunda 128, 279-282

U

Uhlenbeck, George 67-69, 82-83, 233
Ulusal Standartlar Enstitüsü 86, 201-202
Ununoktiyum 107
uranyum
  atomu 103-104
  izotopları 108-109
  izotop farklılıkları 124-125
uyarılmış durum(lar) 17-18, 74-75, 86-87
  ayrı bir varlık olarak 75-79
uyumluluk ilkesi 21-24, 220-221, 313, 315
uzaklık 28, 54, 72-73, 208, 217-218, 222, 226-227, 230, 233, 237-238, 267, 292-293, 295, 298, 311
üç uçlu köşe noktaları 175-176
üstel fonksiyon 89
üst kuark 153-154
üst üste binme 245-249
  büyük fikir 14-15
  gerçeklik olasılık 247-248
  spinleri 139-140, 247-249
  dalgaları 242-245

V

vakum (boşluk) tüpleri 268, 272
valans elektronları 263-265
valans kuşağı 263-165
  kuantum beneklerde 276-277
var olma *bkz.* yok olma ve var olma
vektör niceliği 67-68
verici ve alıcılar 265-267
viskozite 284-285
  etkili, boş uzayda 308-310
vuruş notaları 140

W

W parçacıkları 180-182, 187-188
  dev kütlesi 309-310
  takas parçacığı olarak 57-58
  özellikleri 322
  spini 68-69
Weinberg, Steven 57-58
Weinrich, Marcel 202-203
Wheeler, John
  ve zamanda geriye doğru hareket 178-180
  ve kara delik aforizması 276-277
  kara delik kavramlaştırması 275-276
  ve kara delik entropisi 277-278
  ve fizyon kuramı 124-125
  ve Hugh Everett 313-315
  ve nükleer fizyon 37-38
  ve Planck uzunluğu 292-293
  ve kuantum köpüğü 54-56, 291-293
  ve kuantumun temel ilkeleri 315-317
  ve kaldırım yazısı 296-298
  ve süreçleri toplama yöntemi 249-250
Wieman, Carl 165
Wilson, C.T.R. 256
Wu, Chien Shiung 201-203

Y

Yang, Chen Ning 201-202
yarı kararlı durumlar 261-263
yasalar
  zorunluluk yasaları 206-208
  yasaklayıcı yasaları 206-209
yayıcı, kolektör (transistörde) 272-273
yayınım, var etme olarak 228-229
yer iletkenler 264-267
  n-tipi 265-270, 271-272
  p-tipi 266-270, 271-272
yok olma ve var olma
  "büyük fikir" olarak 14, 15
  devamlılığı sağlamak için birleşmeleri 206, 207
  tüm etkileşimlerin bir özelliği olarak 37, 38, 175-177
  Fermi'nin bu fikirdeki rolü 179-180
yol integral yöntemi 249-250
Young, Thomas 225-226
yörünge hareketi 67-68
yörüngeler, klasik 220-221
yük eşleneği 195-196, 202

Z

Z° parçacığı
bozunumu 144-145
dev kütlesi 309-310
takas parçacığı olarak 57
kütle belirsizliği 145-146
özellikleri 322
spini 68-69
zamanda geriye doğru hareket 177-180
zaman değişmezliği 205-207
tanımı195-196
zaman, ölçekleri 59-60
zayıf etkileşim 179-183
zayıf kuvvet
değişim (takas) kuvveti olarak 57
evrenselliği 57-58
zincirleme tepkime 124-126
Zurek, Wojciech 313, 315
Zweig, George 41